

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA

MECCANICA DEI MATERIALI E PROCESSI
TECNOLOGICI

Ciclo XXI

Settore scientifico disciplinare di afferenza: ING-IND/16

TITOLO TESI

COMPLESSITA' TECNOLOGICA, TRASFERIMENTO DI
TECNOLOGIA E INNOVAZIONE

Presentata da: Ing. Barbara Cimatti

Coordinatore Dottorato

Relatore

Prof. Tullio Trombetti

Prof. Giovanni Tani

Esame finale anno 2009

ABSTRACT

Il presente lavoro ha come obiettivo la *definizione e la misura della complessità tecnologica*, al fine di costruire strumenti a supporto di tutti gli operatori che si occupano dello sviluppo e della fabbricazione di un prodotto industriale, quali progettisti di prodotto e responsabili di produzione.

La ricerca è stata sviluppata attraverso le fasi di seguito descritte.

Analisi dello stato dell'arte su definizioni e misure della complessità in ambito industriale attraverso l'individuazione e studio di oltre un centinaio di pubblicazioni al riguardo.

Classificazione dei metodi proposti in letteratura per la misura della complessità in cinque categorie e analisi critica dei punti di forza e di debolezza dei differenti metodi, ai fini di orientare la elaborazione di un nuovo metodo. Sono stati inoltre analizzati i principali metodi di Intelligenza Artificiale quali potenziali strumenti di calcolo della complessità.

Indagine su tematiche correlate alla complessità quali indicatori, trasferimento tecnologico e innovazione. La complessità viene misurata in termini di un indice che appartiene alla categoria degli *indicatori*, utilizzati in molti ambiti industriali, in particolare quello della misura delle prestazioni di produzione. In particolare si è approfondito significato e utilizzo dell'OEE (Overall Equipment Effectiveness), particolarmente diffuso nelle piccole medie imprese emiliano-romagnole e in generale dalle aziende che utilizzano un sistema produttivo di tipo job-shop. È stato implementato un efficace sistema di calcolo dell'OEE presso una azienda meccanica locale. L'indice di complessità trova una delle sue più interessanti applicazioni nelle operazioni di *trasferimento tecnologico*. Introdurre un'*innovazione* significa in genere aumentare la complessità del sistema, quindi i due concetti sono connessi. Sono stati esaminati diversi casi aziendali di trasferimento di tecnologia e di misura delle prestazioni produttive, evidenziando legami e influenza della complessità tecnologica sulle scelte delle imprese.

Elaborazione di un nuovo metodo di calcolo di un indice di complessità tecnologica di prodotto, a partire dalla metodologia ibrida basata su modello entropico proposta dai Prof. ElMaraghy e Urbanic nel 2003. L'attenzione è stata focalizzata sulla sostituzione nella formula originale a valori determinati tramite interviste agli operatori e pertanto soggettivi, valori oggettivi.

Verifica sperimentale della validità della nuova metodologia attraverso l'applicazione della formula ad alcuni componenti meccanici grazie alla collaborazione di un'azienda meccanica manifatturiera.

Considerazioni e conclusioni sui risultati ottenuti, sulla metodologia proposta e sulle applicazioni del nuovo indice, delineando gli obiettivi del proseguo della ricerca.

In tutto il lavoro si sono evidenziate connessioni e convergenze delle diverse fonti e individuati in diversi ambiti concetti e teorie che forniscono importanti spunti e considerazioni sul tema della complessità. Particolare attenzione è stata dedicata all'intera bibliografia dei Prof. ElMaraghy al momento riconosciuti a livello internazionale come i più autorevoli studiosi del tema della complessità in ambito industriale.

**COMPLESSITA' TECNOLOGICA,
TRASFERIMENTO TECNOLOGICO E
INNOVAZIONE**

1. INTRODUZIONE

1.1 Il tema della complessità

L'argomento complessità è attuale e dibattuto in diversi ambiti scientifici. Esistono molti tentativi di fornire una definizione universale di complessità, ciononostante una definizione unica e generalmente accettata non esiste.

Al contrario di altre grandezze fisiche, la complessità è difficilmente misurabile solo una minoranza degli studi svolti sulla complessità tenta di produrre qualche forma di quantificazione ed è pertanto necessaria nuova attività di ricerca per rendere la complessità un concetto di utilizzo pratico [1].

Fin dai tempi dell'antica Grecia si era intuito che un universo di tipo deterministico, regolato dai concetti di causa ed effetto, non costituiva un modello esaustivo in quanto in qualsiasi fenomeno naturale esiste un principio di imprevedibilità. Il concetto di *Klinamen*, introdotto da Epicuro, secondo il quale gli atomi nel loro movimento dall'alto verso il basso subivano deviazioni tali da consentire loro di scontrarsi e di creare il mondo, ne è un primo esempio. L'imprevedibilità è considerata una delle cause della complessità.

La scienza contemporanea ha compreso che per la conoscenza della realtà non è più sufficiente raccogliere un numero considerevole di dati relativi al fenomeno per ricondurlo ad uno schema unificato come è stato fatto in passato da Galileo o Newton, e che non è solo il numero elevato di variabili in gioco a stabilire la presenza di una complessità, quanto piuttosto il loro essere intrecciate in una rete di relazioni. La complessità dei fenomeni fisici è inoltre dovuta all'apparente mancanza di ordine nella loro evoluzione, che li rende imprevedibili.

L'evoluzione umana e il progresso hanno inoltre comportato un naturale aumento di complessità: pensiamo alle 179 parole contenute nei Dieci Comandamenti dell'antichità confrontate con le 300 della Dichiarazione di indipendenza degli Stati Uniti del 1776 e con le 24.942 parole della recente legge europea che stabilisce dove si può fumare e dove no.

In campo industriale la complessità è aumentata in modo significativo negli ultimi anni, infatti allo scopo di soddisfare i bisogni crescenti dei clienti la varietà di componenti e di prodotti si è ampliata e sono stati introdotti nuovi materiali e tecnologie nella realizzazione di molti prodotti. Consideriamo ad esempio i mezzi di trasporto: dall'invenzione della ruota alle odierne automobili in media costituite da più di 10.000 componenti l'incremento di complessità è

evidente: basta pensare che solo nel periodo tra gli anni '70 e '90 il numero di parti di un'autovettura è aumentato approssimativamente del 400% [2].

Uno dei primi scienziati italiani ad occuparsi di complessità seguendo un approccio interdisciplinare è *Giovanni Scuricini* [3] che negli anni '80 notava che è difficile definire la complessità in un preciso senso formale e dichiarava: "La complessità è una qualità soggettiva, il cui significato e valore cambiano seguendo lo scopo del sistema preso in considerazione."

Il contesto odierno in cui si colloca la complessità si può riassumere in tre aspetti:

- non esistono oggetti semplici, la ricostruzione di un evento osservato sembra rispondere a leggi deterministiche ma va ben oltre queste leggi
- la previsione dello stato futuro di un sistema può sembrare possibile, ma a costo di ridurre qualitativamente la portata del fenomeno studiato
- le qualità riscontrate in un oggetto studiato non sono proprie di quell'oggetto ma sono la risposta della sua interazione con l'osservatore, sono il suo modo di vederle.

Vari dizionari della lingua italiana definiscono la complessità come: "Lo stato o qualità dell'essere intricato, complicato o complesso." Il termine complessità viene normalmente usato nelle situazioni quotidiane per descrivere delle caratteristiche che non è possibile quantificare precisamente e viene associata a sistemi che sono difficili da comprendere, descrivere, prevedere o controllare.

La parola complessità ha origine dal Latino *complexus* che significa cose che interagiscono tra di loro. Al fine di raggiungere uno stato di complessità sono pertanto richiesti due o più componenti connessi tra di loro [4].

Se un sistema complesso fosse lineare ciò che bisognerebbe fare per comprenderlo sarebbe scomporlo in tutti i suoi singoli elementi quindi, trattando ogni componente separatamente, si potrebbe giungere alla soluzione del problema. Ma nella realtà i componenti di un sistema complesso sono connessi tra loro in modo non lineare e spesso contro-intuitivo, pertanto il sistema presenta un comportamento caotico e comprendere i diversi singoli componenti non significa comprendere l'intero sistema.

Il termine complesso può quindi essere interpretato in due modi [5]:

1. consistente in varie parti correlate

secondo questo approccio la complessità è caratterizzata da due dimensioni: la differenziazione relativa al numero dei diversi componenti del sistema e la interdipendenza o connessione tra tali elementi.

2. complicato, intricato

questa definizione mette in rilievo gli aspetti di difficoltà nel comprendere e avere a che fare con un oggetto, correlando pertanto la complessità all'incertezza e imprevedibilità.

Nel primo caso la complessità viene definita come un dato obiettivo la cui misura si basa su dati oggettivi e misurabili senza subire l'influenza della percezione soggettiva. Nel secondo invece la complessità viene interpretata a partire dalla complicazione di una situazione che dipende dalle caratteristiche delle persone coinvolte, come conoscenza, esperienza o intelligenza.

Questa distinzione può essere considerata però solo teorica in quanto [6]:

- quando misuriamo la complessità nelle scienze sociali, facciamo affidamento frequentemente su dati che vengono da sorgenti soggettive
- gli esseri umani e le loro caratteristiche in genere giocano un ruolo importante nelle organizzazioni; pertanto un punteggio di complessità dipende da fattori soggettivi
- i confini del sistema, come ad esempio le variabili che sono considerate rilevanti e che sono tenute in considerazione nella complessità, devono essere determinati dagli umani e questo è necessariamente soggettivo. La complessità operativa di un sistema è misurata con rispetto alla quantità di informazione richiesta per descrivere lo stato del sistema all'interno di confini definiti dal controllore che è un essere umano.

Sono molti coloro che ritengono che misure apparentemente oggettive non possano produrre dati che sono più obiettivi di dati ottenuti da misure basate su percezioni e stime soggettive. La somministrazione di questionari in ambito aziendale, anche al fine della determinazione della complessità, è pertanto una metodologia assai diffusa, come dimostra la letteratura di seguito riportata, e viene considerato un metodo affidabile. La validità dei risultati dipende piuttosto dal numero di interviste condotte: è chiaro infatti che più questo è elevato e più saranno statisticamente significativi i dati raccolti. Nel caso di domande che implicano una opinione del soggetto intervistato, viene largamente usata la tecnica Likert, che consiste nel fare scegliere al soggetto un punteggio variabile in genere da 1 a 5 o da 1 a 7 corrispondente a un giudizio che varia crescendo il punteggio da “non sono d'accordo” a “sono molto d'accordo” vedi Allegato G.

Altro aspetto rilevante ai fini della definizione di complessità è quello dinamico relativo alla evoluzione del sistema nel tempo. Un sistema complesso è un sistema la cui struttura statica e il cui comportamento dinamico è contro-intuitivo, imprevedibile o complicato da tracciare o comprendere [7]. Non è sufficiente pertanto analizzare la struttura del sistema fotografandolo in un certo istante, ma occorre anche seguire la sua trasformazione nel tempo.

Riassumendo gli aspetti che concorrono alla definizione della complessità di un sistema sono [8]:

1. numero di elementi o sotto-sistemi
2. grado di ordine all'interno della struttura degli elementi o sotto-sistemi
3. grado di interazione o connettività tra gli elementi, sottosistemi e l'ambiente
4. livello di varietà, in termini dei differenti tipi di elementi, sottosistemi e interazioni
5. grado di prevedibilità e incertezza all'interno del sistema.

1.2 La complessità tecnologica

La complessità è un tema dibattuto in ambiti scientifici che vanno dalla biologia, all'informatica, alle scienze sociali e trova differenti tipi di applicazione: qui si vuole esaminare il concetto di complessità tecnologica in un contesto di produzione industriale.

Il modello di sistema produttivo utilizzato nel secolo scorso si basava sulla teoria di Taylor che comportava una netta divisione del lavoro e delle operazioni. Il sistema manifatturiero veniva letto come semplice sistema in equilibrio e pertanto facilmente interpretabile [9]. L'evoluzione che ha portato dalla fabbrica in linea di Ford alle attuali metodologie di produzione quali la Group Technology, la produzione flessibile e il Just in Time della Toyota ha comportato un incremento di complessità della gestione dovuta a layout di impianto, macchinari e tecnologie sofisticati e fortemente integrati tra loro. Oggi si è pertanto alla ricerca di un nuovo paradigma che consenta di vedere il sistema produttivo in maniera più realistica, tenendo conto dei suoi aspetti imprevedibili e dinamici, in altre parole viene riconosciuto che il sistema produttivo è un sistema in uno stato permanente di sviluppo e pertanto complesso.

Se il paradigma Tayloriano si basava sulla fisica classica, in termini di equilibrio, stabilità e determinismo, definendo il sistema produttivo a partire da una matematica precisa, il nuovo modello trae spunto dai sistemi biologici e dalla teoria del caos, considerando una evoluzione costante del sistema che richiede continue modifiche e aggiornamenti di operazioni e strutture [9].

Complessità tecnologica é un termine ampio che implica diversi approcci relativi a differenti aspetti e livelli di complessità in ambito industriale. I più ricorrenti sono:

- Complessità di prodotto
- Complessità di processo
- Complessità di sistema manifatturiero

Il terzo livello include i primi due ed è anche correlato con la complessità delle forniture e in generale delle entità esterne che interagiscono con il sistema produttivo.

Al fine di connettere tutti e tre gli aspetti sopra citati si può dare la seguente definizione:

- **la complessità tecnologica indica il livello tecnologico necessario per il progetto e la fabbricazione del prodotto industriale, considerandone caratteristiche e prestazioni.**

1.3 Significato e applicazioni della complessità

Al fine di rispondere ai continui cambiamenti della domanda di mercato e competere in un più dinamico e competitivo mercato industriale, le imprese sono forzate a introdurre più flessibilità nei loro processi e sistemi. Per flessibilità si intende una migliore capacità di adattamento dell'impianto produttivo alle esigenze del mercato e dei clienti in termini di rapida introduzione di nuovi prodotti e di modifica di quelli esistenti, capacità di produrre piccoli lotti a costi competitivi, abilità nell'adattare il prodotto alle specifiche del cliente anche quando queste escano dagli standard di riferimento in tempi brevi e a costi ridotti.

Sebbene la flessibilità possa portare benefici come un incremento di produzione e la customizzazione del prodotto, se non propriamente controllata può anche causare presa di decisioni inefficace, lead time maggiori, mancato rispetto dei piani, costi maggiori e insoddisfazione del cliente. Nonostante il lavoro di ricerca accademica che si sta svolgendo intorno a questo argomento le imprese manifatturiere sono ancora quasi sempre inconsapevoli del legame tra flessibilità e complessità e del fatto che il potenziale incremento di flessibilità può essere realizzato solo se accompagnato da una abilità nel controllo di sistemi di produzione più complessi [10].

Ma la complessità non riguarda solo il prodotto e l'impianto produttivo, anche l'intera organizzazione è evoluta nel tempo e le procedure interne sono divenute più complesse rendendo il tempo di sviluppo di nuovi prodotti più lungo. Un sistema industriale è caratterizzato da un elevato numero di variabili correlate da leggi non sempre lineari che rendono difficile il loro controllo. La complessità è strettamente legata a questo controllo, il cui scopo è di soddisfare i bisogni del cliente all'interno di un vantaggio economico per l'impresa [11]. Pertanto la complessità del sistema è una causa cruciale di molti problemi manageriali nelle imprese e provoca un incremento dei costi. Nasce il bisogno di trovare nuove soluzioni per il management di produzione che consentano di ridurre la complessità a favore di una maggiore semplicità. Pur mantenendo tutte le funzionalità del prodotto è infatti importante, dove possibile, utilizzare

metodologie di progettazione e tecnologie di fabbricazione più semplici e quindi gestibili con maggiore facilità e rapidità.

La complessità può aggiungere valore o meno alla produzione: lo aggiunge nel senso che corrisponde a un aumento di flessibilità che consente di soddisfare le variazioni della domanda, ma non lo aggiunge se è dovuta a sovra-produzione, rottura delle macchine, deviazione dalla programmazione prevista o più in generale ad eventi che insorgono inaspettati [8].

Si riassumono nella tabella 1.1 i differenti aspetti a connotazione positiva e negativa che caratterizzano il concetto di complessità, riferito ad un ambito produttivo [12].

Se ci riferiamo all'impianto produttivo e alla sua gestione, l'aumento della complessità determina una maggiore difficoltà organizzativa e maggiori problemi di carattere gestionale, anche il lead time (tempo di attraversamento che il prodotto impiega dall'ordine alla consegna) e i costi subiscono un incremento ma allo stesso tempo l'aumentare della complessità corrisponde ad una maggiore varietà dei prodotti e ad un loro migliore adattamento alle esigenze del cliente (customizzazione), nonché a una maggiore flessibilità dell'impianto.

 COMPLESSITA'	
<i>ASPETTI NEGATIVI</i>	<i>ASPETTI POSITIVI</i>
 difficoltà organizzativa e problemi gestionali	 varietà prodotti
 lead time	 flessibilità impianto produttivo
 costi	 customizzazione
 difficoltà assemblaggio prodotto	 modularità prodotto
 affidabilità prodotto	 numero di funzioni prodotto

Tab.1.1 Effetti dell'incremento di complessità [12]

Se scendiamo sul livello del prodotto, l'aumento di complessità implica una maggiore difficoltà di assemblaggio, dovuta al maggiore numero di componenti e al loro più elevato grado di interrelazione, e una diminuzione dell'affidabilità del prodotto che diminuisce all'aumentare del numero di componenti. Infatti se un prodotto è costituito da più parti qualora anche una di queste si guasti, l'intero prodotto non funziona. Viceversa la crescita di complessità può determinare un aumento del numero di funzioni del prodotto e comportare una progettazione di tipo modulare, in cui diversi prodotti vengono assemblati a partire dagli stessi componenti raggruppati in opportuni gruppi costruttivi combinati in modi diversi. Questo consente una maggiore semplicità e rapidità di progettazione e un aumento della flessibilità della produzione con conseguente ottimizzazione di tempi e costi. Basti pensare a questo proposito alla Group Technology in cui i prodotti simili dal punto di vista morfologico e tecnologico vengono raggruppati in famiglie fabbricate che condividono componenti e tecnologie di fabbricazione.

Valutare la complessità del sistema manifatturiero è necessario pertanto per ottenere una definizione del sistema e una consapevolezza della estensione dei problemi, delle loro cause, dei loro effetti e quindi di come affrontarli e risolverli.

La misura della complessità consente di individuare gli aspetti del sistema più complessi e le relative cause, mettendo i manager di produzione in grado di intervenire per ridurla, pur mantenendo la flessibilità del sistema.

Al momento manca un modello universale per rappresentare la complessità di un'industria manifatturiera, in quanto la varietà, il dinamismo, e l'incertezza sulle cause di tale complessità e sulle loro relazioni rende difficile fornire una definizione unica che possa essere accettata da tutti.

Lo scopo principale della presente ricerca è quello di individuare una nuova metodologia di misura della complessità tecnologica al fine di creare nuovi strumenti che possano supportare il management di un'azienda produttiva nelle decisioni relative al prodotto e ai processi tramite i quali viene fabbricato. In funzione del livello di complessità del prodotto sarà infatti possibile individuare i requisiti tecnologico-produttivi necessari all'impresa per realizzarlo.

Le applicazioni di una misura della complessità tecnologica possono essere molteplici:

- valutazione di fabbricabilità di prodotto
- valutazione di infrastrutture industriali
- scelta di processi produttivi
- valutazione dell'introduzione di innovazione
- misura delle prestazioni di un sistema produttivo

- determinazione degli aspetti critici di produzione
- individuazione dei componenti fabbricabili internamente ed esternamente
- confronto con stabilimenti produttivi della concorrenza
- pianificazione di trasferimenti tecnologici
- pianificazione della politica industriale di un distretto.

La misura della complessità può fornire inoltre importanti indicazioni al progettista del prodotto e al progettista dell'impianto manifatturiero, in merito alla scelta delle attrezzature e del layout dell'impianto di produzione.

2. INDICATORI

2.1 Relazione tra indicatori e complessità in ambito industriale

Obiettivo principale del presente lavoro è il calcolo di un indice di complessità e pertanto risulta importante approfondire la tematica degli indicatori, anche ai fini di comprendere meglio il significato di misura della complessità tecnologica. Inoltre *i fattori che intervengono nella complessità sono molteplici e rappresentabili in termini di un numero anche molto elevato di indicatori*, occorre pertanto affrontare il problema di come sintetizzare e aggregare tali indicatori in un unico indice, che verrà affrontato brevemente in questo capitolo.

Indicatori e complessità sono tra loro strettamente legati in quanto *la scelta delle misure è direttamente relazionata alla natura delle attività manifatturiere (e quindi alla loro complessità)*. Una misura rilevante per una produzione a flusso continuo sarebbe totalmente priva di significato per una produzione a celle caratterizzata da una elevata varietà di prodotti [13].

		Complexity	
		High	Low
Uncertainty	High	Capital goods Machine tools Aerospace Process plant Product Design & Devt	Short Life Cycle Textiles Spare parts Fashion products Time to market
	Low	Durables White goods Pumps and valves Automotive Supply chain flexibility	Commodity Components Fasteners Mouldings Productivity and cost

Fig.2.1 Classificazione delle imprese manifatturiere basato su complessità e incertezza [13]

Un possibile approccio per facilitare la scelta delle misure è identificare le caratteristiche di produzione basate sulla complessità tecnologica e sull'incertezza dell'ambiente competitivo, così come mostrate in figura 1. Questo approccio semplifica il processo di definizione del sistema di misura focalizzando gli indicatori più significativi per la realtà produttiva considerata [13].

Nel settore CAPITAL GOODS (beni capitali o strumentali) gli indicatori significativi sono relativi alla fase di Progettazione e Sviluppo del prodotto.

Nel Settore DURABLES (beni durevoli) gli indicatori significativi si riferiscono alla flessibilità della catena di fornitura

Nel settore SHORT LIFE CYCLE l'indicatore più rappresentativo è il time to market.

Nel settore COMMODITY (componenti, dispositivi di chiusura, dispositivi per lo stampaggio) occorre monitorare il sistema attraverso indicatori di produttività e costo.

Attualmente, uno dei punti deboli dei sistemi di misurazione delle performance aziendali è l'assenza di attenzione all'uso di misure basate sulla tecnologia, che sono invece essenziali per garantire una visione completa dal basso verso l'alto. Le misure tecnologiche, come ad esempio la vita utile di uno strumento, le emissioni acustiche o le forze di taglio, sono raramente menzionate dagli esperti di management anche se possono avere un impatto diretto sui costi, sui tempi e sulla qualità della produzione.

Inoltre sono numerose le misure non quantitative che hanno effetto sulla funzione di produzione. Tali misure possono essere stabilite solo in maniera qualitativa, come ad esempio motivazione, visione, dinamiche di gruppo, tipo di organizzazione fattori legati al personale [13]. Lo sforzo ora è quello invece di individuare indicatori tecnologici che siano oggettivi, e ricavabili automaticamente dai database aziendali, ai fini di avere indicazioni meno arbitrarie e metodologicamente riconosciute sull'impresa.

2.2 Definizione e proprietà degli indicatori

Nell'ottica di internazionalizzazione delle imprese e di trasferimento delle tecnologie descritta nel precedente capitolo:

- Gli indici e indicatori consentono una rapida trasmissione di informazione tra i nodi della rete globalizzata di produzione
- Sono universali e interpretati univocamente dai diversi utilizzatori, quindi costituiscono uno strumento indispensabile nella attuale produzione dislocata su più sedi anche in paesi diversi.

Valutare e misurare i diversi aspetti di un prodotto e di un sistema produttivo è un'azione fondamentale ai fini di potere monitorarlo, controllarlo e quindi migliorarlo. La misura fa parte del processo di diagnosi/analisi di identificazione di dove le attività di miglioramento dovrebbero essere prioritarie [14].

Le proprietà di un oggetto possono essere giudicate e descritte attraverso tre operazioni di base: *misure, valutazioni e preferenze* basate su *empiricità*, cioè il risultato di osservazioni, *oggettività* vale a dire indipendenza dal soggetto e *soggettività* cioè dipendenza dal soggetto. Si aggiunge una quarta operazione a completare il quadro [15]:

		OGGETTIVO	
EMPIRICO		NO	SI
	NO	Preferenza	Imposizione
	SI	Valutazione	Misura

Tab.2.1 Relazione tra misura, preferenza, valutazione e imposizione rispetto a empirismo e oggettività [15].

Tutte le operazioni indicate in tabella portano alla definizione di *indicatori*, pertanto misure, valutazioni, preferenze e imposizioni, sono tutti sottoinsiemi degli indicatori [15].

La scelta degli indicatori è un punto importante della strategia aziendale in quanto l'azienda diventa ciò che misura. Infatti si misurano le prestazioni in termini solo del numero di prodotti fabbricati e non si considera il numero di prodotti difettosi, il personale trascurerà la qualità a vantaggio della produttività.

Gli indicatori possono essere classificati in diverse categorie [15]

- *Indicatori monetari* che si distinguono in:
 - *Indicatori economici*: sono calcolati a partire dal bilancio finale, quindi sono il risultato di decisioni passate
 - *Indicatori finanziari* : sono usati per fare previsioni future
- *Indicatori di processo*: si riferiscono ad una specifica attività svolta all'interno dell'azienda.
- *Indicatori di base*: ottenuto da osservazione diretta di un sistema empirico.
Ex. numero di prodotti difettosi di una linea produttiva.
- *Indicatori derivati*: ottenuto dalla sintesi di due o più indicatori di base.
Ex. rapporto tra prodotti buoni e difettosi di una linea produttiva.

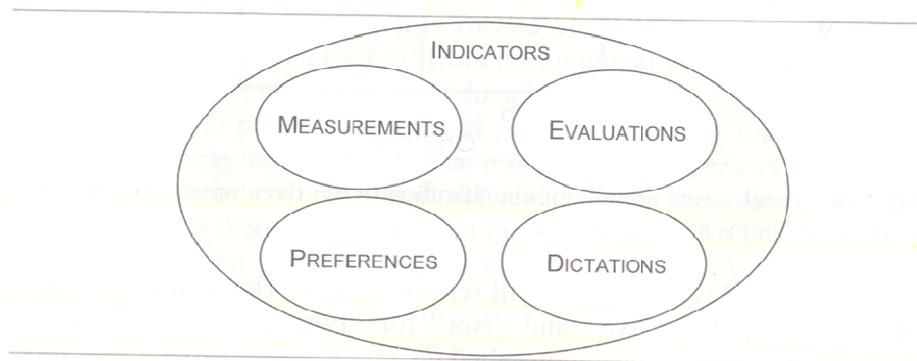


Fig.2.2 Insieme degli indicatori e sottoinsiemi [15]

Gli indicatori possono essere di varia natura [15]:

- misure quantitative o per conteggio (ex. numero di difetti o non conformità, numero di prodotti venduti e fabbricati, ecc.)
- tasso o percentuale (ex. % degli ordini evasi nei termini concordati)
- rapporto (ex. rapporto tra numero di prodotti difettosi e numero di prodotti buoni)
- indice ponderale di più misure (calcolato come media pesata fra diversi aspetti valutati)
- secondo una scala qualitativa (un giudizio può essere espresso attraverso espressioni comuni quali “buono”, “sufficiente” ecc. riportate in una scala predefinita);
- simbolistica che identifichi una condizione (ex. OK, O,↓,↑)

Fattori chiave di qualsiasi misura sono [4]:

- | | | |
|---------------|-----------------------------------|--|
| 1.validità | 3.sufficienza | 5.tempismo |
| 2.completezza | 4.sufficiente frequenza di misura | 6.facilità di comprensione dei termini |

Nel caso specifico del processo si distinguono [16]:

- *Misure di tempo*: si riferiscono ai tempi di sviluppo del processo.
Ex. *time to market* tempo che intercorre tra l’ideazione del prodotto e il suo lancio sul mercato
- *Misure di qualità*: correlano le caratteristiche del prodotto ai bisogni dei clienti e alla efficienza del processo.
Ex. numero di prodotti difettosi fabbricati in un anno
- *Misure di produttività*: rapporto tra gli output e gli input di processo.
Ex. numero di pezzi prodotti in un’ora.

E’ utile definire la differenza tra produttività e efficienza [17]:

Produttività: comunemente espressa come un semplice rapporto tra output prodotti e input consumati, è percepita come una misura facilmente interpretabile di prestazione operativa.

Efficienza: denota la relativa misura di produttività risultante da un confronto con alcune referenze altre unità di confronto e/o valori storici.

2.3 Storia degli indicatori di processo

Il primo a definire l'efficienza di un processo produttivo è Tjalling Koopmans, economista olandese, vincitore, insieme a Leonid Kantorovič, del Premio Nobel per l'economia nel 1975, "per i contributi alla teoria dell'allocazione ottimale delle risorse", che nel 1951 definisce la efficienza tecnica una funzione di produzione che, per una data tecnologia, trasforma un vettore di input in un vettore di output. Un vettore input-output è tecnicamente efficiente se e solo se è possibile incrementare l'output ottenuto (o diminuire l'input utilizzato), solo mediante la riduzione di un altro output (o l'aumento di un altro input) [18].

Debreu introduce la prima misura radiale di efficienza produttiva data dal "coefficiente di risorse utilizzate" per unità di output [19]. A Farrell risale una misura di efficienza globale (o economica) come prodotto del punteggio dell'efficienza tecnica (isoquante) e dell'efficienza allocativa (tangente isocosto-isoquante) [20].

Un semplice esempio di misurazione secondo il metodo proposto da Farrell, relativo a imprese che utilizzano due input (x_1 e x_2) per produrre un output singolo (y), sotto l'ipotesi semplificatrice di assenza di economie/diseconomie di scala, può essere esemplificato in fig. 2.3.

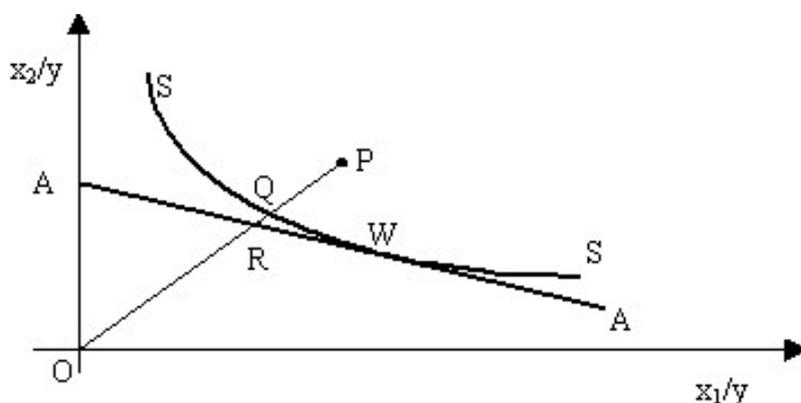


Fig.2.3 Efficienza tecnica e allocativa [20]

Se una data unità produttiva utilizza le quantità di input identificate dalla posizione nel piano cartesiano del punto P, per produrre una unità di output, l'in-efficienza tecnica (TE) di quell'impresa può essere rappresentata dalla distanza QP, che rappresenta l'ammontare di quanto gli input potrebbero essere proporzionalmente ridotti senza alcuna riduzione in termini di output. Tale misura è data dal rapporto OQ/OP (che è uguale a $1-QP/OP$), che assume valori compresi fra 0 e 1 (impresa tecnicamente efficiente, identificata in fig.3. dal punto Q, che, infatti giace sull'isoquante unitario SS).

Se si conosce anche il rapporto fra i prezzi unitari degli input (rappresentato in fig.2.3 dall'isocosto AA), si può calcolare l'indice di efficienza allocativa (AE), che per l'impresa operante in P è dato dal rapporto fra OR/OQ , dal momento che la distanza RQ rappresenta la riduzione nei costi di produzione che si può ottenere se il processo produttivo avvenisse in corrispondenza del punto di efficienza allocativa (e tecnica) W, invece che al punto Q che risulta essere tecnicamente efficiente ma economicamente inefficiente.

L'efficienza economica globale (EE) del punto P è data dal rapporto OR/OP (la distanza RP può essere interpretata in termini di riduzione di costi), che si può ottenere come risultato del prodotto fra l'efficienza tecnica ed allocativa precedentemente calcolate.

Queste semplici misure di efficienza presuppongono che la funzione di produzione dell'impresa pienamente efficiente sia nota. In realtà questo non si verifica, e l'isoquante efficiente deve essere stimato da un campione di dati (sample data). Farrell suggerisce pertanto l'utilizzo di un isoquante non-parametrico convesso e lineare a tratti, costruito in modo tale che nessuno dei punti osservati appartenenti al campione stia alla sinistra o al di sotto (fig. 2.4).

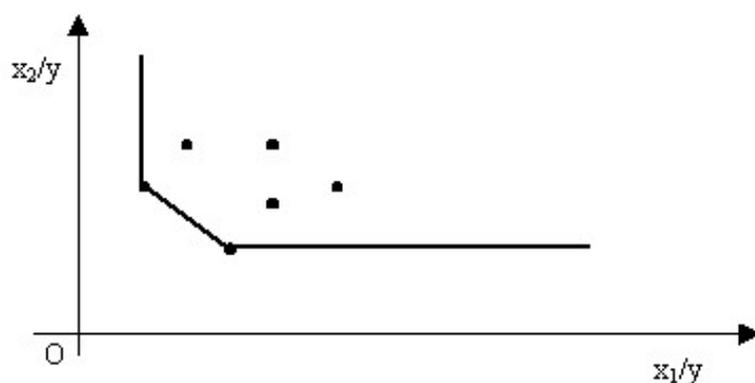


Fig.2.4 Rappresentazione dell'isoquante convesso lineare a tratti [20]

Le diverse misure di efficienza proposte presentano il carattere comune di essere misure radiali, ovvero di mantenere costante la relativa proporzione di input (output). In quanto radiali esse sono invarianti alla scelta dell'unità di misura.

In questo contesto di analisi della produttività gli input e gli output sono misurati in termini di quantità fisiche, o loro equivalenti. Nelle operazioni manifatturiere gli output sono usualmente misurati tramite il numero di unità prodotte, e gli input in termini di ore/uomo relativamente alla forza lavoro, ore/macchina rispetto agli input di investimento e quantità di input materiali [21].

A partire dalle teorie di Koopmans, Debreu e Farrel, altri studiosi hanno fornito proposte di misura dell'efficienza tecnica variando opportunamente i pesi dei fattori [22] ma sempre nell'ambito di un approccio economico.

L'evoluzione dagli anni '60 ad oggi delle misure di produttività ha corrisposto al passaggio da semplici considerazioni di costo a indicatori di produttività, qualità e quindi a forme multidimensionali, vedi fig. 2.5. La misura della prestazione manifatturiera rimane ad oggi un argomento non definito a causa alla natura diversa e multidimensionale della produzione [13].

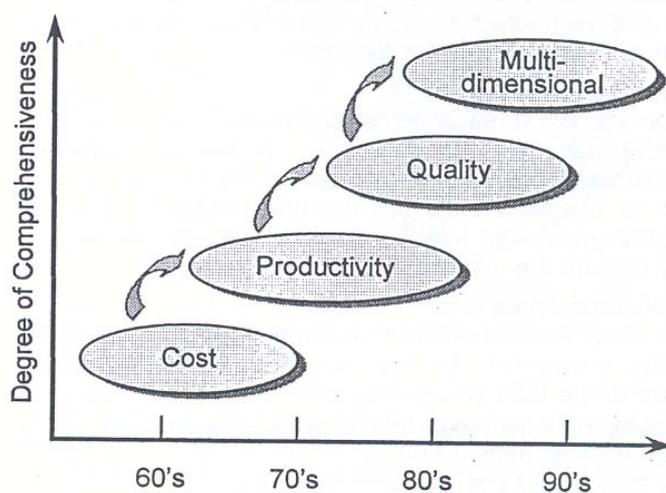


Fig. 2.5 Evoluzione delle misure di prestazione produttiva nel tempo [13]

2.4 Problema della sintesi e aggregazione degli indicatori:

La traslazione degli obiettivi aziendali in indicatori di prestazione è una operazione critica. Le domande che ci si deve porre sono:

- Quanti indicatori usare?

- Quali indicatori usare?
- Come aggregare gli indicatori in uno solo?

E' comune in media per una grande azienda disporre di 50-60 indicatori di natura finanziaria e non finanziaria. Per un supporto efficace il management deve individuare i più significativi denominati *Key Performance Indicators* (KPI) e aggregarli tra loro.

Al momento, pur mancando ancora un metodo ottimale, i metodi più diffusi di *sintesi* ai fini di individuare i KPI sono di seguito elencati e brevemente descritti [15]:

1. Sintesi basata sul concetto di *importanza relativa*
2. Sintesi del *minimo set di copertura*
3. Sintesi basata sul *grado di correlazione degli indicatori*

Nel primo caso si utilizzano matrici delle relazioni tra obiettivi aziendali (in riga) e indicatori (in colonna) e si selezionano gli indicatori *più importanti* ai fini del raggiungimento degli obiettivi a partire da tali matrici

Nella seconda metodologia l'obiettivo è individuare il *set minimo* di indicatori in grado di coprire tutti gli obiettivi di dell'azienda. Si tratta di un classico problema di ottimizzazione combinatoria per risolvere il quale si utilizza l'algoritmo di Nemhauser.

Infine nel terzo caso si considera che due indicatori sono correlati se variazioni del primo determinano variazioni del secondo e viceversa. Il metodo si basa sulla creazione a partire dalla matrice di relazione di una matrice di correlazione tra indicatori che consenta di selezionare quelli più correlati.

I tre metodi forniscono risultati in genere differenti che dipendono principalmente da valori di soglia che si devono scegliere e non si può definire un metodo migliore degli altri. A seconda del contesto e degli obiettivi può essere più opportuno utilizzare uno dei tre.

La sintesi degli indicatori più significativi viene realizzata attraverso matrici riempite con punteggi proporzionali all'importanza dell'indicatore in diversi lavori scientifici [23], mentre in altri si utilizza la metodologia QFD (Quality Function Deployment) finalizzata alla selezione dei KPI [24].

Una volta individuati i KPI la *aggregazione* può avvenire secondo diverse metodologie, le più comuni sono tre è [15]:

1. Assegnazione di pesi in base all'importanza (metodo soggettivo)
2. Individuazione di un indicatore derivato di Borda
3. Individuazione di un indicatore derivato di Condorcet
1. Diversi pesi definiscono diverse strategie di valutazione

Ex. selezione degli studenti in entrata ad una Università

$$I_{TOT} = \frac{5}{10} I_1 + \frac{3}{10} I_2 + \frac{2}{10} I_3$$

I_1 = voto di diploma

I_2 = risultato di un test scritto di ingresso

I_3 = risultato di un colloquio orale di ingresso

I due metodi di aggregazione 2 e 3 vengono illustrati tramite un esempio:

Quale è la migliore linea produttiva tra le 4 di uno stabilimento che produce sistemi di gas di scarico per auto?

Indicatori:

- numero di item prodotti al giorno
- numero di item rifiutati perché difettosi al giorno
- percentuale di ore di fermo per non funzionamento delle macchine

Come aggregare i 3 indicatori in uno solo per rispondere alla domanda?

	LINEE DI PRODUZIONE			
INDICATORI	A	B	C	D
Produzione giornaliera	360	362	359	358
Difettosità giornaliera	35	32	36	40
Indisponibilità delle attrezzature produttive	4%	5,5%	4,5%	5%

Tab.2.2 Valori di 3 indicatori scelti per la valutazione di 3 linee di produzione [15]

	LINEE DI PRODUZIONE			
INDICATORI	CLASSIFICA			
Produzione giornaliera	B	A	C	D
Difettosità giornaliera	B	A	C	D
Indisponibilità delle attrezzature produttive	A	C	D	B

Tab.2.3 Classifica delle 3 linee in base ai 3 indicatori valutati singolarmente [15]

2. Indicatore derivato di Borda:

$$I_B(x) = \sum_{i=1}^m I_i(x)$$

dove $I_i(x)$ è il posizionamento ottenuto dalla linea x rispetto all' i esimo indicatore e m è il numero di indicatori.

Vince la linea con punteggio più basso:

$$I_B(x^*) = \min_{x \in S} \{I_B(x)\}$$

Ex.

linea A: $2+2+1 = 5$

linea B: $1+1+4 = 6$

linea C: $3+3+2 = 8$

linea D: $4+4+3 = 11$

Vince la linea A.

3. Indicatore derivato di Condorcet

Si confrontano le linee a due a due indicando quante volte la linea è posizionata in ciascuna classifica più in alto dell'altra, si considera il valore minimo e si stila una nuova classifica.

$$I_C(x) = \min_{x \in S - \{x\}} \{i: xPy\}$$

dove i è il numero di indicatori di base in cui x eccede y e P è l'operatore di preferenza, vince la linea con il valore più alto.

$$I_C(x^*) = \max_{x \in S} \{I_C(x)\}$$

	A	B	C	D	I_C	Classifica
A	-	1	3	3	1	2°
B	2	-	2	2	2	1°
C	0	1	-	3	0	3°
D	0	1	0	-	0	3°

Tab.2.4 Elaborazione del metodo di Condorcet applicato alle 3 linee [15]

Vince la linea B.

Anche nell'aggregazione di indicatori come nella sintesi le tre metodologie portano a risultati diversi, dimostrando come l'individuazione e interpretazione di indicatori sia ancora un argomento aperto e complesso.

Altri metodi di aggregazione sono stati proposti basandosi sull'integrale di Choquet [25], e il problema della sintesi e aggregazione è stato risolto a partire dalla raccolta di dati tramite interviste e utilizzando il modello AHP (Analytic Hierarchy Process) insieme ad un software EC (Expert Choice) per l'elaborazione[26].

2.5 Proprietà e individuazione di indicatori

Gli indicatori consentono di valutare un duplice tipo di prestazione:

- performance singola (locale). Misura del processo in termini di un singolo aspetto e quindi dal punto di vista di un singolo indicatore;
- performance di insieme (globale): misura dell'intero processo, o di una ben definita porzione dello stesso. La performance globale è complessa da rappresentare perché deve tenere conto di ogni sua singola dimensione locale e della relativa prestazione.

Risultano quindi evidenti alcune proprietà fondamentali degli indicatori:

- La rappresentatività
- La semplicità e l'agevole interpretazione
- La capacità di indicare la tendenza nel tempo
- La sensibilità ai cambiamenti che avvengono nell'organizzazione o nell'ambiente esterno
- La facilità nella raccolta ed elaborazione dei dati
- La rapidità nell'aggiornamento.

Di seguito si propone una tassonomia delle proprietà degli indicatori che vengono classificate in quattro categorie: proprietà generali, proprietà di un insieme di indicatori, proprietà degli indicatori derivati e proprietà accessorie. Tali proprietà costituiscono un utile strumento per la selezione e la valutazione degli indicatori di performance in differenti contesti applicativi.

A partire dalle proprietà descritte, si propone una procedura per guidare la costruzione e la verifica degli indicatori per un generico processo. La procedura che viene rappresentata nel diagramma a flusso della figura 6 prevede le seguenti fasi:

- 1) individuazione del processo e delle dimensioni caratteristiche
- 2) individuazione degli obiettivi di rappresentazione
- 3) analisi dell'orizzonte temporale degli obiettivi di rappresentazione e del loro impatto sugli attori del processo (verifica proprietà accessorie)
- 4) definizione preliminare degli indicatori
- 5) verifica, per ciascun indicatore, della proprietà di coerenza con l'obiettivo rappresentazionale

Categoria	Proprietà	Breve descrizione
Proprietà generali	Coerenza con l'obiettivo di rappresentazione	Un indicatore deve operationalizzare adeguatamente l'obiettivo di rappresentazione
	livello di dettaglio	Un indicatore deve presentare il giusto dettaglio informativo
	Non contro-produttività	Un indicatore non deve generare effetti negativi sugli altri indicatori
	Impatto economico	Un indicatore deve minimizzare l'impatto economico connesso con il suo utilizzo
	Facilità d'uso	Un indicatore deve essere facilmente interpretato e utilizzato
Proprietà di un insieme di indicatori	Esaustività	Un insieme di indicatori deve rappresentare adeguatamente le dimensioni del sistema da modellizzare
	Non ridondanza	Un insieme di indicatori non deve contenere ridondanze
Proprietà degli indicatori derivati	Monotonia	L'incremento o il decremento di un singolo indicatore deve determinare un corrispondente incremento/decremento dell'indicatore derivato associato
	Compensazione	Singoli indicatori possono o meno generare effetti di compensazione nell'indicatore derivato costituente
Proprietà accessorie	Obiettivi di lungo periodo	Un indicatore deve incoraggiare il raggiungimento di obiettivi di lungo periodo
	Impatto verso gli attori del processo	Per ciascun indicatore deve essere considerato l'impatto verso gli attori del processo (stakeholder)

Fig. 2.6 Tassonomia delle proprietà degli indicatori [15]

- 6) selezione del set di indicatori e verifica delle proprietà di esaustività e non ridondanza
- 7) definizione, per ogni indicatore, della scala di misura e delle modalità di raccolta dati; verifica delle proprietà di supporto (facilità d'uso, impatto economico, non controproduttività, ecc)
- 8) per gli indicatori derivati, verifica delle proprietà di monotonia e compensazione.

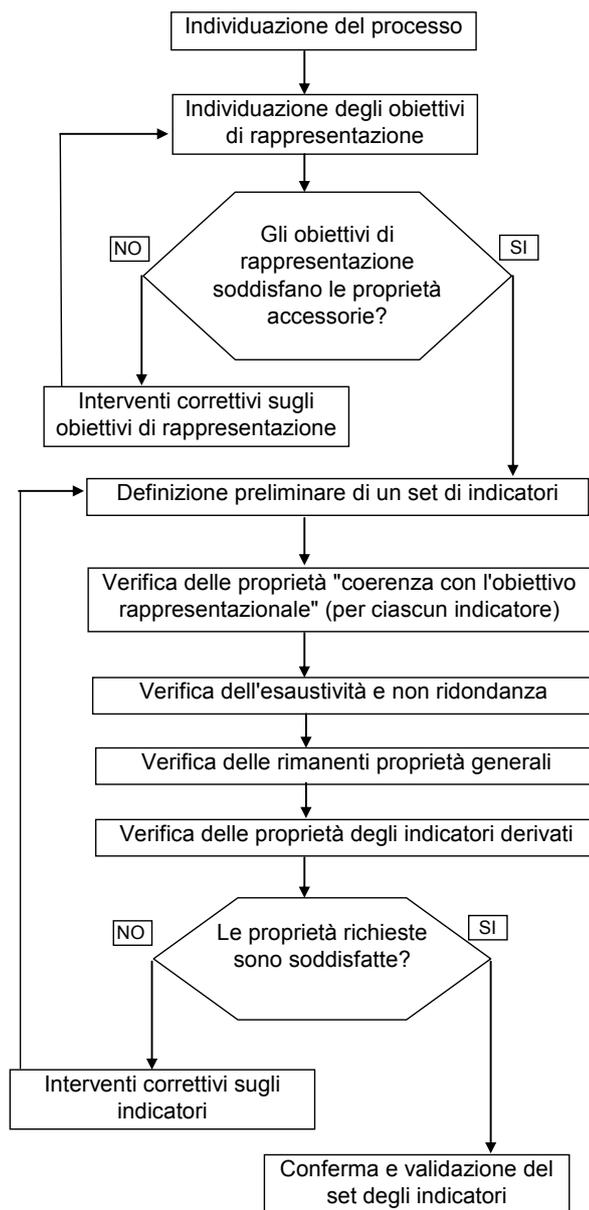


Fig. 2.7 Processo di selezione/allestimento di una famiglia di indicatori [15]

2.6 Valutazione delle prestazioni produttive

2.6.1. Definizioni e TPM

Una possibile definizione di indicatore di prestazione è una variabile che indica la efficacia e/o efficienza di una parte o dell'intero processo o sistema rispetto a una data norma/obiettivo o piano [27].

Nel contesto dei sistemi di produzione, vengono individuati sette scopi necessari sia da un punto di vista operativo che di controllo [28].

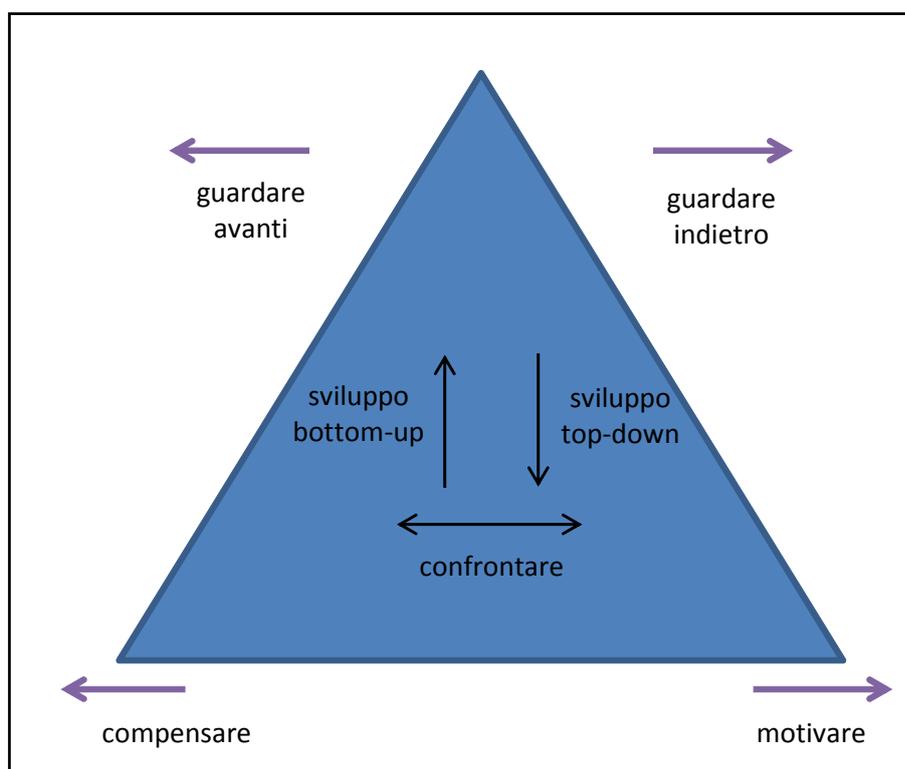


Fig.2.8. I sette scopi di una misura di prestazione di Meyer [28]

Considerando la dimensione temporale, una misura può aiutare a prevedere il futuro o quantificare risultati già ottenuti. In una prospettiva organizzativa, una misura può corrispondere ad una visione dal basso verso l'alto consentendo un legame tra le prestazioni delle unità operative e quelle dell'organizzazione. Viceversa può svilupparsi dal centro verso le singole unità operative. Una misura può anche essere impiegata per confrontare le performance tra le unità operative orizzontalmente all'interno della stessa azienda. Infine, da un punto di vista umano, una misura può essere usata per necessità motivazionali e di compensazione.

La valutazione di prestazione tramite indicatori è caratterizzata da due aspetti: flessibilità e incertezza fig.2.9 . Il primo è dovuto al fatto che l'obiettivo sia o meno pienamente soddisfatto o soltanto parzialmente soddisfatto. Il secondo è dovuto all'incertezza della misura (dovuta all'acquisizione dei dati) [29]. *E' significativo notare che questi due aspetti sono tra le cause dell'incremento della complessità*, a conferma del legame esistente tra l'utilizzo di indicatori per la valutazione delle prestazioni e la complessità tecnologica.

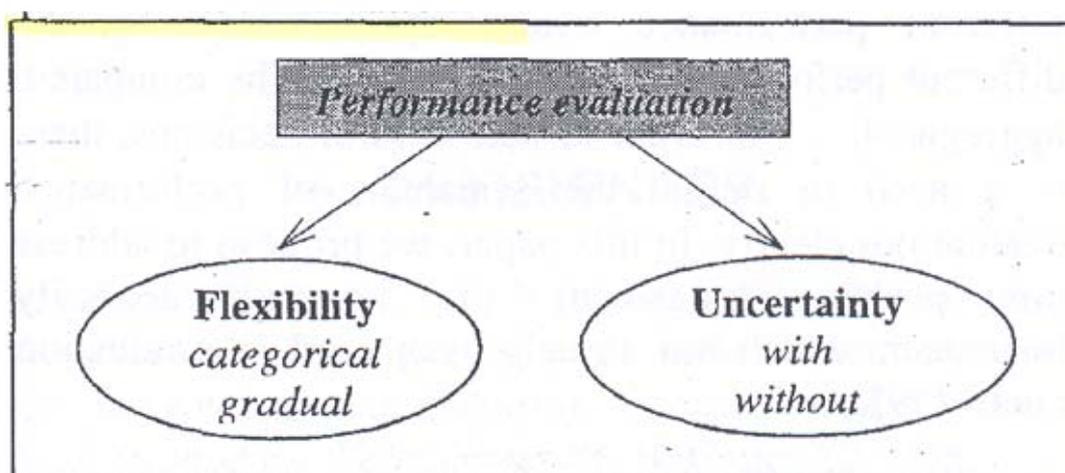


Fig.2.9 Caratteristiche della valutazione di prestazione

Un interessante studio [30] propone una metrica delle prestazioni produttive consistente in tre misure:

1. Impegno in R&D misurato attraverso l'intensità dei consumi di R&D come una percentuale sulla rendita di vendita.
2. Grado di outsourcing per misurare in che estensione l'impresa decide di fabbricare o acquistare i componenti necessari al processo all'esterno.
3. Attuazione di tecniche di Time compression al fine di ridurre i tempi di produzione misurate attraverso ITO (Inventory Turn Over).

Viene svolta una indagine empirica che dimostra come la prestazione produttiva possa essere migliorata attraverso un maggiore impegno in R&D e compressione del tempo di produzione. Quindi l'incremento dei fattori 1 e 2 porta a un aumento di produttività.

Per quanto riguarda invece il grado di outsourcing viene osservata una relazione quadratica che determina che per tassi di outsourcing compresi tra il 30 e l'80 % (valori osservati) le imprese con più elevato outsourcing mostrano livelli non proporzionali, quindi più bassi, di prestazione

produttiva. I tre indicatori vengono inoltre aggregati secondo un modello proposto al fine di determinare un unico indice prestazionale.

Il concetto di misura delle prestazioni viene associato a quello di perdita, in base alla teoria TPM (Total Productive Maintenance) di Seiichi Nakajima introdotta negli anni '80 [31] che è uno dei punti di partenza per affrontare la tematica della valutazione di performance di un'impresa produttiva.

La TPM persegue i seguenti obiettivi:

- ricerca di efficacia ed efficienza globale
- riduzione di tutti i costi a carico dell'impianto
- manutenzione integrata - prevenzione guasti
- coinvolgimento di tutta l'organizzazione aziendale

Al fine di introdurre quanto segue è opportuno distinguere tra Efficienza e Efficacia in produzione.

Per *efficacia* si intende il grado in cui l'output del processo è conforme ai requisiti. Per *efficienza* invece il grado con cui il processo produce l'output richiesto al minimo costo delle risorse [32].

La TPM si basa sulla classificazione di 6 tipi di perdita che vengono dettagliate in tab.2.5 e che occorre eliminare per migliorare l'efficienza dell'impianto.

	Perdite	Definizione
Tempi di fermo	Guasti	Rotture e guasti dei macchinari
	Set-up	Tempi di set-up e attrezzaggio
Riduzioni di velocità	Malfunzionamenti	Riduzioni di velocità dovuti al mal funzionamento di sensori di azionamento e controllo
	Velocità reali ridotte	Discrepanze tra la velocità prevista e quella reale del macchinario
Difetti	Scarti e rilavorazioni	Pezzi non conformi da scartare o rilavorare
	Produzione ridotta	Numero di pezzi non conformi prodotti in fase di avviamento dei macchinari

Tab.2.5 Tipi di perdite secondo TPM [31]

Nella TPM viene individuato un indicatore, tra quelli attualmente più diffusi nelle aziende produttive soprattutto quelle di tipo job shop: l'OEE, Overall Equipment Effectiveness.

2.6.2 OEE

L'OEE identifica e quantifica le perdite di una singola macchina, a partire da tre contributi ciascuno riferito ad una delle tre categorie di perdite sopra elencate [30] e si calcola come segue:

$$OEE = \textit{availability} \times \textit{performance} \times \textit{quality}$$

dove

$$\textit{availability} = \frac{\textit{operation time}}{\textit{loading time}}$$

$$\textit{operation time} = \textit{loading time} - \textit{equipment downtime}$$

$$\textit{loading time} = \textit{total available time} - \textit{planned downtime}$$

in cui:

Availability: tiene conto dei *tempi di fermo* macchina

Loading time: tempo disponibile per giorno o mese

Total available time: totale tempo lavorativo per giorno o mese

Planned downtime: tempo di fermo macchina per manutenzione programmata e attività di gestione della produzione che richiedono le macchine ferme

Equipment downtime: tempo di fermo macchina per guasti e rotture, set e aggiustamenti (per ex. cambio di stampi ecc.)

$$\textit{performance efficiency} = \textit{net operation rate} \times \textit{operating speed rate}$$

$$\textit{net operation rate} = \frac{\textit{actual processing time}}{\textit{operation time}} = \frac{\textit{processed amount} \times \textit{actual cycle time}}{\textit{operation time}}$$

$$\textit{operating speed rate} = \frac{\textit{ideal cycle time}}{\textit{actual cycle time}}$$

$$\text{performance efficiency} = \frac{\text{processed amount} \times \text{ideal cycle time}}{\text{operation time}}$$

in cui:

Performance: tiene conto delle *perdite di velocità*

Net operation rate misura la velocità di produzione reale

Actual processing time: tempo totale reale di ciclo in un giorno,

Processed amount: numero di pezzi processati in un giorno

Actual cycle time: tempo reale di ciclo

Operation time: tempo operativo cioè tempo totale di lavorazione – fermi macchina pianificati e non pianificati in un giorno

$$\text{quality} = \text{quality rate of products}$$

L'interpretazione dell'OEE consente pertanto di individuare l'entità delle perdite del macchinario di produzione classificate in base alla suddivisione della tab.2.5 e di stabilire le azioni correttive da implementare per eliminarle.

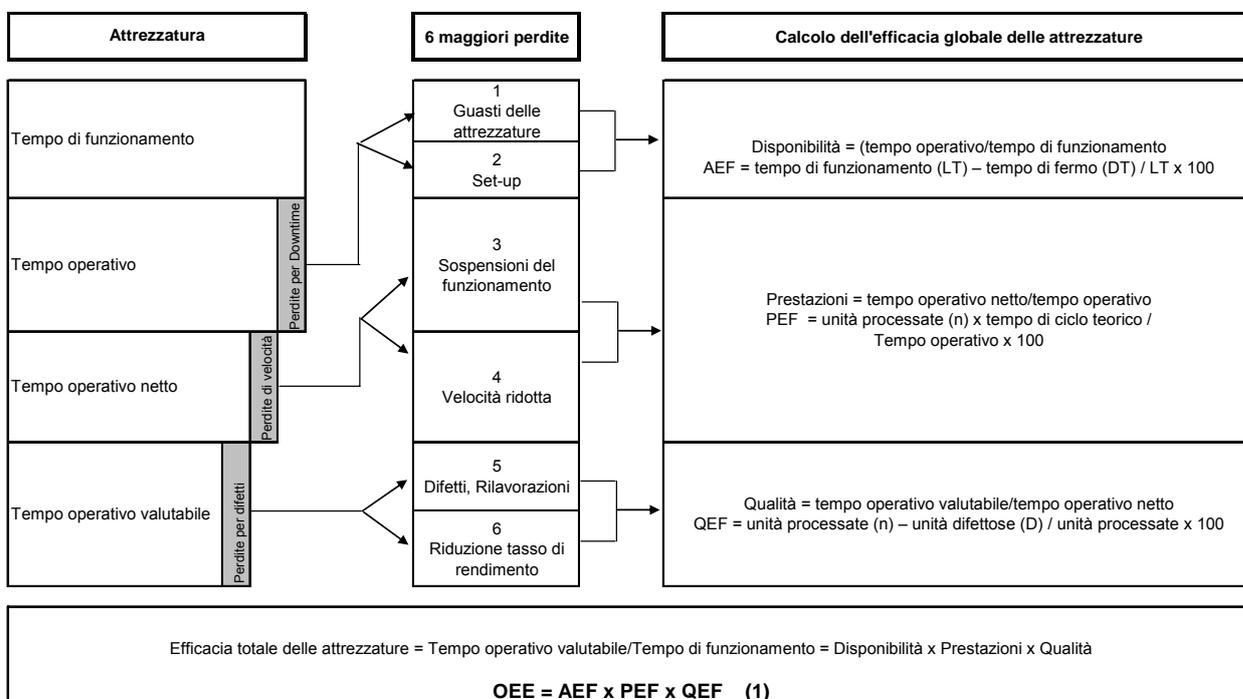


Fig.2.10 Rappresentazione grafica dei sei tipi di perdite correlate identificabili attraverso il calcolo dell'OEE [31]

In allegato A si riporta un esempio di calcolo dell'OEE, dal quale risulta evidente come sia difficile ottenere dei valori elevati considerando che è ottenuto dal prodotto di tre fattori che devono pertanto risultare tutti contemporaneamente elevati, la rappresentazione grafica piramidale del calcolo dell'OEE riportata in figura [33] risulta esplicativa al proposito. Anche negli impianti considerati abbastanza performanti l'OEE risulta basso e i valori auspicabili superiori all'85% difficilmente raggiungibili.



Fig.2.10 Piramide di calcolo dell'OEE [33]

L'OEE però si riferisce ad un singolo macchinario, senza tenere conto della necessaria integrazione tra le diverse macchine che caratterizza quasi tutti gli impianti produttivi, inoltre non considera tutti i tipi di perdita, quindi non è l'indicatore più adatto a rappresentare tutte le situazioni produttive.

L'utilizzo dell'OEE è abbastanza frequente presso le industrie emiliano-romagnole in quanto si tratta spesso di PMI che utilizzano sistemi di produzione job shop, dove pertanto è significativo valutare la performance del singolo macchinario. Non sempre però le aziende calcolano correttamente l'indice, in quanto il rilevamento dei dati viene effettuato in maniera manuale soggetta pertanto a frequenti errori o comunque senza seguire una corretta procedura.

Da un'indagine condotta dalla rivista Packaging World negli USA nel 2003 [33] emerge che solo il 47% delle aziende manifatturiere che utilizzano l'OEE si considerano in grado di calcolarlo correttamente e di condividere le informazioni con coloro che le necessitano.

La principale ragione per questa mancanza di successo sta nel modo in cui i dati sono raccolti:

- 13% non raccolgono i dati
- 62% usano una modalità di raccolta manuale.

A quest'ultimo proposito in allegato B viene presentato un significativo caso aziendale nel quale, dopo il riscontro di errori nel calcolo dell'OEE dovuti principalmente ad una non corretto rilevamento manuale dei dati, si è impostata una nuova procedura per la raccolta dei dati

consentendo di giungere al valore corretto dell'indicatore ed ad una sua efficace elaborazione. L'azienda è così in grado ora di individuare le cause di perdita e apportare efficaci azioni correttive per incrementare la propria produttività.

2.6.3. Indicatori derivati dell'OEE

Sono stati proposti molti altri indicatori che derivano dall'OEE e che lo completano in diverse modi che sono stati con successo verificati sperimentalmente in diversi contesti aziendali.

Esempi sono:

- OPE (Overall Plant Effectiveness) riferito a tutte le risorse produttive comprendendo i legami con la catena di fornitura, OAE (Overall Asset Effectiveness) riferito allo sfruttamento efficace delle risorse produttive, TEEP (Total Equipment Effectiveness Performance) che differisce rispetto all'OEE solo include il planned downtime che veniva invece sottratto nel calcolo dell'OEE [32]
- OFE (Overall Factory Effectiveness) che considera le relazioni tra diverse macchine e processi [32,34], OTE (Overall Throughput Effectiveness) riferito alle operazioni di fabbricazione che aggiungono valore al prodotto [32]
- OLE (Overall Line Effectiveness) riferito all'intera linea di produzione nel caso di produzione continua in linea [35], PEE (Production Equipment Effectiveness) dove ai diversi termini dell'OEE vengono attribuiti opportuni pesi [36].

In tutti i casi l'obiettivo è quello di misurare le perdite, individuare le cause e portare azioni correttive [32].

Nella figura 2.11 vengono riportati tutti gli indicatori sopra elencati rispetto alle perdite individuate: risulta evidente come, passando da OEE all'OAE e OPE, vengono considerate sempre più perdite, non solo interne ma anche esterne all'azienda, cioè dovute al rapporto con i fornitori, a cause logistiche, ambientali ecc.

Sono stati proposti anche altri modelli di misura basati su una somma pesata di indicatori riferiti a qualità (lamentele cliente), costo (costo della qualità), consegna dei prodotti (on time delivery) e efficacia del macchinario [37].

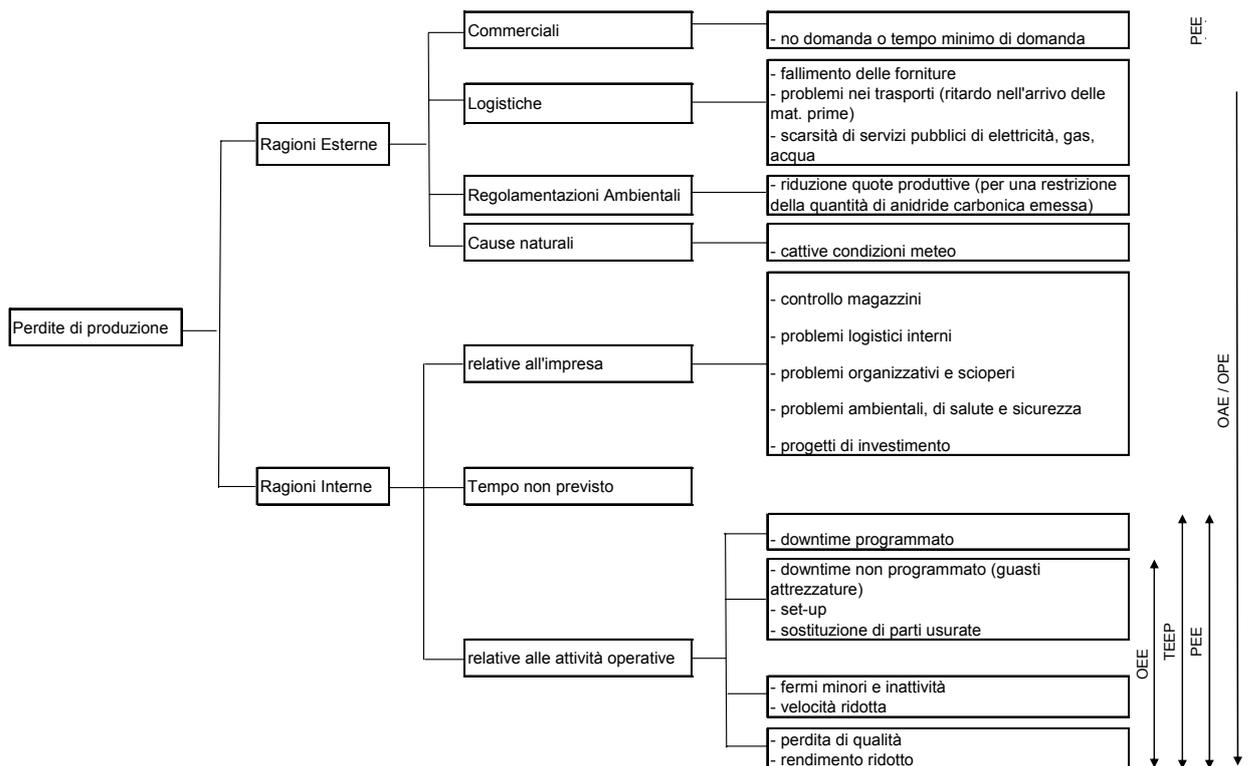


Fig.2.11 Classificazione delle perdite di produzione e relativi indicatori di produzione [32]

Uno degli aspetti più difficili da misurare in un ambito produttivo è la flessibilità manifatturiera. Non a caso, come già sottolineato, flessibilità e complessità sono tra loro connesse e ***un metodo di misura della flessibilità può essere indicativo anche ai fini dell'elaborazione di un metodo di misura della complessità.***

A questo proposito in Koste, Malhotra e Sharma [38] propongono un questionario mirato ad individuare i seguenti indicatori di flessibilità:

- Flessibilità macchina
- Flessibilità lavoro
- Flessibilità movimentazione materiale
- Flessibilità di mix
- Flessibilità di nuovo prodotto
- Flessibilità di modifica

Queste dimensioni della flessibilità sono considerate significative per potere misurare quanto rapidamente e facilmente è possibile eseguire cambi di produzione in termini di nuovi prodotti, contenendo i costi.

Ogni dimensione comprende 4 elementi:

1. numero di possibili opzioni del sistema/risorsa
2. grado di differenza tra le differenti opzioni
3. mobilità, cioè grado di facilità con cui l'organizzazione si sposta da uno stato ad un altro
4. uniformità che coglie qualsiasi alterazione o deterioramento del sistema quando gli viene richiesto un comportamento flessibile

per una scala complessiva 24 (6 x 4).

Questi 4 elementi di ogni dimensione di flessibilità possono essere distinti in due concetti "scopo" e "fattibilità". Il primo fattore comprende i primi due elementi in quanto riesce a cogliere lo scopo della risposta flessibile in termini dei range interi in cui ricadono le possibili opzioni e della loro diversità. Il secondo fattore comprende il terzo e il quarto elemento esprimendo le penalità dello stato transitorio di breve termine e della durata di lungo termine quando viene richiesta la risposta flessibile al sistema. L'azienda deve essere consapevole di questi due aspetti ai fini di potere intervenire con azioni efficaci per migliorare la flessibilità della produzione e in generale la propria produttività.

I punteggi attribuiti ai fattori di scopo e fattibilità possono essere usati per confrontare un sottoinsieme di imprese con rispetto alle loro scelte di flessibilità e osservare gli scambi fatti all'interno e attraverso le dimensioni di flessibilità. Insieme con lo sviluppo della scala stabilire le relazioni scopo - fattibilità tra gli elementi di flessibilità di un sistema produttivo fornisce una base migliore per misurare e creare una comprensione olistica di questo sistema complesso.

Il questionario per le cui risposte sono state utilizzate scale Likert (vedi allegato G) è stato somministrato a 762 aziende manifatturiere di settori in cui la flessibilità è considerata particolarmente strategica ottenendo 158 risposte.

Le misure differenziano chiaramente le organizzazioni focalizzate sullo scopo o sulla fattibilità e forniscono strumenti di benchmarking e di diagnostica secondo quanto prima enunciato.

Recentemente il gruppo di ricerca dei Prof. ElMaraghy, che verrà più volte citato nel corso di questo lavoro dato che si tratta dei massimi esperti di complessità in ambito industriale attualmente riconosciuti, ha individuato un metodo di misura della flessibilità di un sistema manifatturiero [39] che consiste nel confrontare il sistema con un sistema idealizzato per una certa famiglia di prodotti. Il livello di flessibilità per ogni sistema è pertanto misurato in confronto con il sistema ideale corrispondente ad una massima flessibilità. La scala è espressa come percentuale di abilità nel range da zero (sistema completamente dedicato) a uno (flessibilità estrema).

Per illustrare il metodo vengono di seguito riportate quattro alternative di sistema come mostrato in fig. 2.12.

- Sistema A: classico macchinario dedicato con mandrino fissa e una tavola porta pezzo a un asse (flessibilità estremamente limitata)
- Sistema B: mandrino multi-asse con un asse aggiuntivo della tavola portapezzo per un totale di tre + un asse.
- Sistema C: uguale alla soluzione B completata dall'uso di adattatori della testa del mandrino che rendono la soluzione più flessibile
- Sistema D: flessibilità massima ottenuta grazie all'aggiunta di un riposizionamento del prodotto a 90 gradi rispetto alla opzione B. Consente di lavorare tutte le facce del pezzo posto sulla tavola.

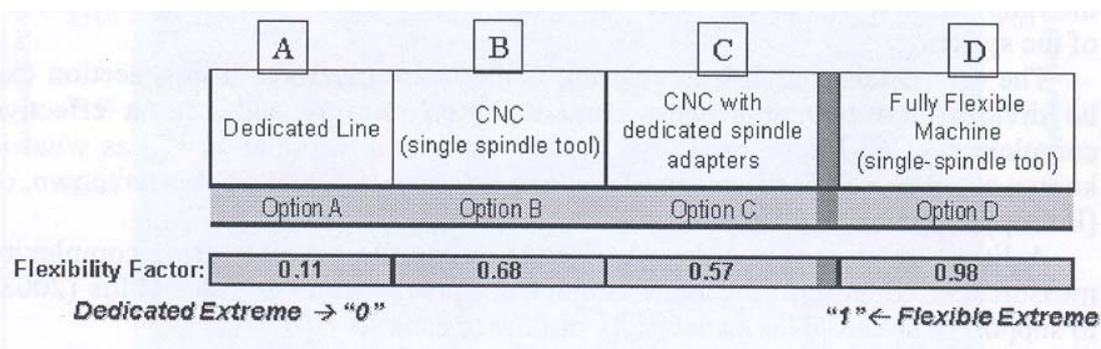


Fig. 2.12 Esempi di sistemi dedicato, dedicati flessibili e flessibile [39]

La proposta metrica viene utilizzata per definire una relazione costo complessità di un sistema manifatturiero che verrà individuata dagli stessi autori e riportata nel paragrafo 9.1.

2.7 Elenco dei principali indicatori di produzione e loro utilizzo

Nel presente lavoro si è elaborato un elenco dei principali indicatori di prestazione produttiva fino ad oggi proposti e utilizzati nelle aziende, classificandoli nelle diverse categorie individuate in letteratura. Si tratta di un utile strumento per coloro che vogliono scegliere gli indicatori più adeguati per monitorare la produzione della propria azienda.

La scelta degli indicatori di prestazione è direttamente collegata alla natura delle attività produttive. Una misura rilevante per una linea a flusso continuo può risultare insignificante per una cella di assemblaggio caratterizzata da un'alta varietà di prodotti fabbricati. *Per facilitare la scelta delle misure si possono identificare le caratteristiche produttive dell'azienda basate sulla*

complessità tecnologica e sull'incertezza dell'ambiente competitivo. In questo modo si semplifica il processo di progettazione del sistema di misurazione individuando gli indicatori di performance chiave per la realtà produttiva presa in esame.

Si possono distinguere sette principali metriche rivolte alla misurazione delle performance dei soli fattori di diretta competenza del reparto di produzione. Tali metriche, rappresentate in figura 2.13 sono: Tempo, Qualità, Produttività, Throughput, Flessibilità, Soddisfazione del Cliente e Costo. Le performance di altre aree significative dell'azienda quali il marketing, il pricing, le risorse umane sono volutamente escluse, avendo scelto di concentrarsi sulla parte produttiva.

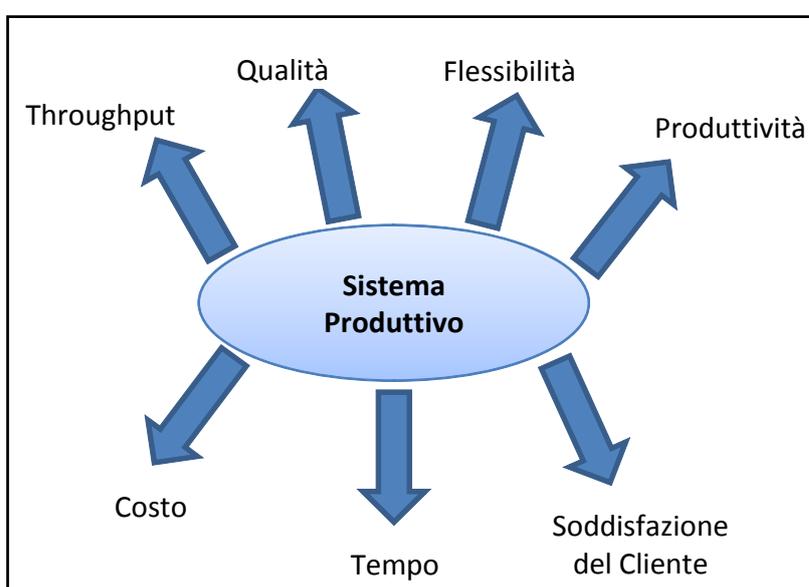


Fig. 2.13 Tipologie di misura riferite ad un sistema produttivo

Per ciascuna metrica è possibile individuare alcuni indicatori che possono essere utilizzati per la valutazione del sistema produttivo, tenendo in considerazione in particolare i seguenti aspetti [13]:

- Le tecniche di produzione impiegate;
- Le misure di performance più importanti;
- Il numero di misure di performance già utilizzate;
- L'applicabilità delle misure di performance;
- I piani futuri per la misurazione delle performance.

Si riportano di seguito le misure di performance più rappresentative per ciascuna metrica.

Misure di Tempo: grandezze che sintetizzano le condizioni operative interne di un sistema produttivo quantificate sulla base della variabile tempo.

Misure di Produttività: grandezze che permettono di valutare le condizioni operative che determinano la produttività di un sistema e dei singoli fattori (manodopera, impianti e materiali) che, a loro volta, contribuiscono al raggiungimento di un determinato livello di produttività.

Misure di Qualità: “...la Qualità è l’insieme delle proprietà e delle caratteristiche di un determinato prodotto o servizio che gli permettono di soddisfare esigenze esplicite o implicite del cliente...” (Norme ISO-UNI).

Si può riferire la qualità ad un prodotto o servizio, oppure ad un processo (produttivo o gestionale):

- Nella sua accezione di prodotto, la qualità viene solitamente definita come predisposizione all’uso al quale il prodotto medesimo è destinato;
- Nella sua accezione di processo, la qualità assume i connotati di conformità, cioè di capacità di fornire in modo consistente risultati (cioè prodotti o servizi) conformi alle richieste cliente;

La qualità di un processo produttivo si può manifestare secondo tre dimensioni:

1. Qualità di Conformità: caratteristica di realizzare prodotti tutti rigorosamente conformi alle specifiche di progetto;
2. Qualità come Affidabilità: capacità di un prodotto o processo di mantenere inalterate nel tempo e nello spazio le proprie caratteristiche funzionali indipendentemente dalla modalità d’uso;
3. Qualità come Manutenibilità: capacità di un prodotto o processo di recuperare con facilità le caratteristiche di buon funzionamento, dopo averle perdute.

Misure di Flessibilità: La flessibilità è la capacità del sistema operativo di rispondere ai cambiamenti esterni (esogeni) ed interni (endogeni) con transitori brevi e poco costosi.

La flessibilità viene anche denominata efficienza dinamica di un sistema operativo, per contrapposizione alla produttività, che ne misura l’efficienza statica.

Misure di Soddisfazione del Cliente: La soddisfazione del cliente è influenzata da molto fattori quali i tempi di risposta, la qualità dei prodotti, il livello di servizio offerto, ma solo alcuni di essi sono di diretta responsabilità dell’area di produzione. In particolare i parametri da considerare in questo contesto sono il rispetto dei tempi di consegna e dei requisiti di qualità dei prodotti.

TEMPO	PRODUTTIVITA'	QUALITA'	FLESSIBILITA'	SODDISFAZIONE DEL CLIENTE	COSTO	THROUGH-PUT	ALTRI IBRIDI
Manufacturing Lead Time Tempo medio di produzione	Produttività Globale prodotto tra il coefficiente di Utilizzo e il Rendimento $\frac{Prod\ eff\ in\ ore\ std}{T\ apertura\ impianto}$	% Scarti indicatore degli sprechi necessari per mantenere la qualità	Time To Market Misura la flessibilità di prodotto cioè la capacità di introdurre un nuovo prodotto in tempi ridotti e a basso costo	Lateness Sfasamento temporale tra la data di completamento del lotto e la data di consegna	costi degli scarti	Plant Capacity Capacità produttiva teorica o reale Si ottiene come il prodotto tra Pmix x Rendimento x T apertura impianto x coef. di Utilizzo	Coeff. di Utilizzo o Saturazione $\frac{T\ eff\ di\ prod}{T\ apert\ imp}$
Tempo Ciclo Teorico	Produttività della Manodopera prodotto tra il coefficiente di Utilizzo e il Rendimento $\frac{Volumi\ prodotti}{Nr\ adetti}$	% Rework indicatore degli sprechi necessari per mantenere la qualità	Capacità produttiva Teorica Misura la flessibilità di volume cioè la capacità di un impianto di cambiare il volume produttivo senza sensibili variazioni del costo unitario di produzione	Tardiness Segnala un ritardo se $T_j > 0$	costi di set-up	Tasso di prod. std o eff. è dato dal reciproco del tempo std o eff. unitario di produzione	Coeff. di disponibilità $\frac{UT}{UT + DT}$
Takt Time Ritmo della produzione "Tempo totale disponibile/Richieste cliente"	Produttività degli Impianti prodotto tra il coefficiente di Utilizzo e il Rendimento $\frac{Volumi\ prodotti}{Capacità\ prod\ installata}$	NRTF Not Right First Time	NR di Modelli prodotti Misura la flessibilità di mix (operativa) cioè la capacità di cambiare il tipo di prodotto fabbricato in tempi brevi e costi bassi	Lateness medio obiettivo: $L_m = 0$	costi della qualità	Pmix $\frac{Qt\ tot\ prod}{Ore\ per\ prod\ il\ mix\ assegganto}$	Rendimento $\frac{Prod\ eff\ in\ ore\ std}{T\ eff\ di\ prod}$
TIP Ratio Time in Process Tempo di attraversamento del pezzo per ogni macchina Tempo di Set-Up misura le attività a non valore aggiunto	Produttività dei Materiali prodotto tra la Resa Lorda e il Rendimento $\frac{Volumi\ prodotti}{Materiali\ impiegati}$	MTTF Mean Time To Failure		Tardiness medio obiettivo: min Tm	costi unitari di produzione	WIP Numero di unità contemporaneamente presenti nel sistema	
Tempo di Fermo Macchina misura le attività a non valore aggiunto MakeSpan Tempo totale che N lotti trascorrono nel sistema Obiettivo: min MAK	OEE e derivati permette di identificare le ragioni di perdita della produttività	Affidabilità del SP Probabilità che dopo un intervallo preciso di tempo il sistema sia ancora funzionante		NR NR di lotti in ritardo	costi per unità di materiale impiegato	WIP Ratio code di attesa alla macchina	
		MTTR Mean Time To Repair		RC Reclami dei clienti		
		Manutenibilità del SP Probabilità cumulativa di aggiustare il sistema nel tempo dt		RS NR di Resi		

Tab.2.6 Classificazione degli indicatori di produzione

Misure di Costo: quantificano in termini economici tutte le grandezze presentate; occorre considerare quindi costi degli scarti, costi di set-up, costi della qualità, costi unitari di produzione, costi per unità di materiale impiegato ecc.

Misure di Throughput: si tratta di grandezze che permettono di quantificare in termini di unità prodotte il volume o la capacità produttiva di un sistema.

Misure Ibride: per completare il modello è necessario introdurre una nuova categoria che chiameremo “ibrida”, all’interno della quale sono stati classificati tutti quegli indicatori che, per loro natura, non possono essere chiaramente ricondotti alle sette metriche sopra citate e che inoltre, sono caratterizzati da finalità informative disomogenee. Tuttavia sono fondamentali sia da un punto di vista diagnostico, che per la loro funzione di “indicatori di base” ovvero utilizzabili per il calcolo di alcuni indicatori derivati presenti all’interno del modello.

Nella tabella 2.6 si riporta la classificazione dei principali indicatori utilizzati in produzione nelle categorie sopra descritte.

Uno dei punti deboli dei sistemi di misurazione delle performance produttive è la scarsa importanza assegnata alle misure basate sulla tecnologia, come ad esempio la vita utile di uno strumento, le emissioni acustiche o le forze di taglio. Raramente tali misure vengono considerate, mentre possono avere un impatto diretto sui costi, sui tempi e sulla qualità della produzione.

Giancarlo Barbiroli ha proposto per porre rimedio a questa mancanza una serie di nuovi indicatori che consentono di calcolare diverse efficienze relativamente ai differenti aspetti del sistema produttivo [40, 41], ma che nonostante la validità scientifica non si sono riusciti a diffondersi presso le aziende.

In particolare ha definito i 12 seguenti indicatori:

1. efficienza di input
2. efficienza di qualità assoluta di prodotto
3. efficienza di qualità costante di prodotto
4. efficienza di volume di prodotto
5. efficienza di variabilità di mix
6. efficienza di macchinario che opera staticamente
7. efficienza di macchinario che opera dinamicamente
8. efficienza di ciclo dei materiali
9. efficienza di ciclo di energia
10. efficienza ambientale di prodotto finale

11. efficienza ambientale di processo totale
12. efficienza ambientale di ciclo energetico

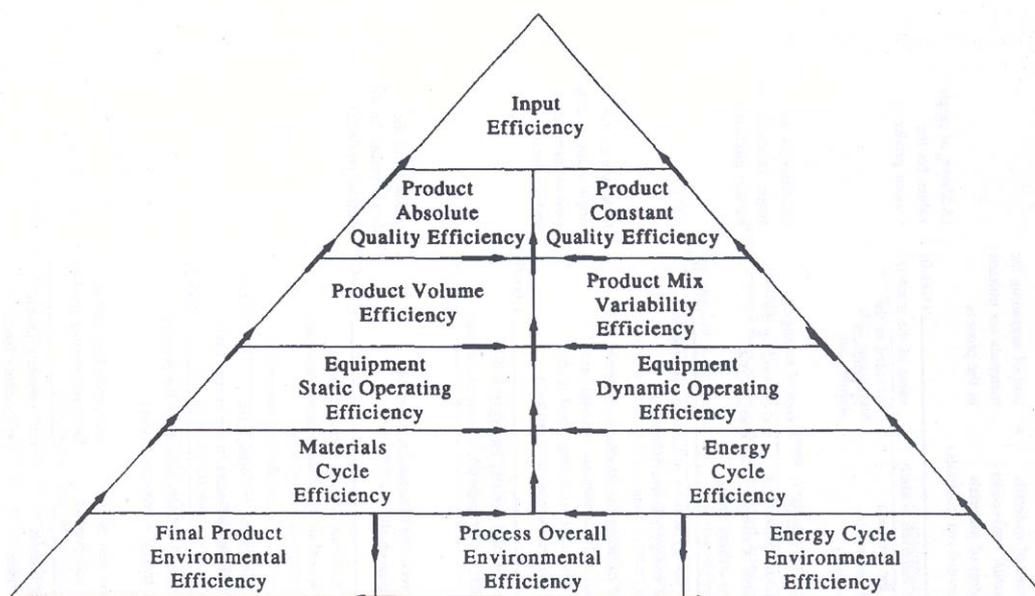


Fig.2.14 Rappresentazione delle interconnessioni tra i dodici indicatori proposti da Barbiroli [40]

Tutti gli indicatori vengono definiti per esempio nel caso dell'efficienza di ciclo dei materiali (8):

$$\frac{\text{quantità dei materiali originali realmente trasformati e inclusi nel prodotto (ton)}}{\text{quantità dei materiali originali introdotti nel processo (tons)}}$$

e di quella di ciclo energetico:

$$\frac{\text{quantità di energia realmente utilizzata nelle varie fasi del processo (MJ)}}{\text{quantità delle sorgenti e forme di energia introdotte nel processo (MJ)}}$$

e per tutti gli altri 10 indicatori in maniera analoga,

Si tratta infatti di efficienze relative ai diversi aspetti della produzione.

Esistono inoltre altri fattori difficilmente quantificabili che hanno un effetto diretto sulla produzione e che vengono pertanto in genere valutati in maniera qualitativa.

Alcuni esempi sono [13]:

- Leadership: dei responsabili che deve essere autocratica, partecipativa, delegante, motivazionale;
- Cultura: sistema di valori, pratiche aziendali, dinamiche di squadra, apprendimento;
- Organizzazione: a matrice, funzionale, divisionale;
- Personale: modalità di reclutamento, di formazione, soddisfazione sul posto di lavoro.

Si riportano in Allegato C significato e modalità di calcolo degli indicatori introdotti nel presente paragrafo.

In seguito ad un corretto rilevamento dei dati, alla individuazione di indicatori di base o derivati, e alla loro interpretazione, l'ultima fase consiste nell'apportare *azioni correttive per il miglioramento del sistema*. Molti dei lavori scientifici al riguardo si limitano ad individuare gli indicatori e al più al correlarli con le perdite ma raramente offrono uno strumento concreto per applicare i risultati alla produzione reale. La difficoltà maggiore deriva dal fatto che essendo il problema multidimensionale, gli input sono caratterizzati da unità di misura diverse e quindi difficilmente confrontabili.

La soluzione può essere quello di agire sulle singole dimensioni, in particolare cercando, una volta individuate, di limitare ciascun tipo di perdita, lavorando sulla relativa dimensione, ma sono stati proposti anche metodi di ottimizzazione stabilendo dei range tra un valore minimo e uno massimo che possono essere utilizzati per i diversi parametri di processo, cercando quindi la combinazione ottimale di tutti i parametri. In particolare è stato proposto l'uso di programmazione lineare basata sul metodo Simplex dallo stesso Barbiroli e Donini [42] e altri strumenti matematici di ottimizzazione che possono costituire un valido supporto per i responsabili della produzione.

3. INNOVAZIONE E COMPLESSITA'

3.1 Innovazione: definizione e fattori determinanti

La complessità tecnologica è strettamente correlata all'evoluzione della tecnologia stessa, quando si introduce innovazione si incrementa la complessità e pertanto **l'innovazione di prodotto e di processo sono aspetti da considerare ai fini di una definizione completa ed esaustiva della stessa complessità tecnologica.**

L'incremento di complessità dovuto alla introduzione di nuove tecnologie e alla integrazione di differenti componenti dei sistemi manifatturieri è giustificabile solo nel caso di miglioramento della prestazione del sistema ma in caso contrario deve essere minimizzato [43].

Determinano un processo innovativo di prodotto e di processo tutte quelle attività di natura scientifica, tecnologica, organizzativa, finanziaria e commerciale che realizzano e rendono disponibili sul mercato delle versioni caratterizzate da un miglioramento funzionale rispetto alle precedenti e soluzioni alternative dirette alla soluzione dei medesimi problemi e alla soddisfazione dei medesimi bisogni [44].

L'innovazione pertanto deve essere distinta dall'invenzione e dal prototipo tecnico in quanto si riferisce alla tecnologia utilizzata o applicata per la prima volta commercialmente.

Numerosi elementi interagiscono nel provocare il processo innovativo: i bisogni di chi utilizza, lo stato delle conoscenze e delle tecnologie, la struttura del mercato, le dotazioni delle risorse dell'adottante, il sistema dei prezzi relativi e le condizioni ambientali in genere [45]. Il potenziale innovativo di un'impresa può essere considerato come funzione dell'ambiente, includendo fattori sociali, economici e politici, dello stato di sviluppo della tecnologia e delle informazioni sulla tecnologia. [46]

La generazione dell'idea dalla quale ha origine il processo innovativo parte dall'esame dei bisogni del mercato e delle possibilità tecnologiche. Esistono due correnti di pensiero riguardo alla motivazione che induce l'innovazione:

- Technology Push
- Demand Pull

In base alla teoria della *Technology Push* i nuovi prodotti e i nuovi processi vengono generati prima di tutto dall'avanzamento della conoscenza scientifica.

Dal punto di vista della *Demand Pull* invece sono le opportunità create dalle mutevoli configurazioni della domanda, da livelli di costo particolarmente alti o da particolari scarsità di input che ovviamente inciderebbero sui margini di profitto, a determinare le dimensioni e l'orientamento dell'attività di ricerca.

E' stato notato che la teoria della Demand Pull può essere utilizzata per spiegare lo sviluppo nei settori tradizionali ed ormai maturi, mentre la teoria delle opportunità tecnologiche ha un maggiore potere esplicativo nei settori "research-intensive"[47].

In realtà si è recentemente giunti alla conclusione che nei sistemi industriali moderni coesiste e prevale, a seconda del tipo di industria, l'azione di entrambi i meccanismi.

L'innovazione di prodotto in particolare è ormai considerata un elemento chiave per avere successo nel mercato. In passato si considerava possibile lo sviluppo di tale innovazione solo all'interno dei limiti del processo di sviluppo del prodotto stesso, mentre oggi è evidente che altre fasi del ciclo di vita del prodotto possono rappresentare opportunità aggiuntive che contribuiscono direttamente a questo tipo di innovazione [48]. Ne è un esempio la realizzazione di prodotti eco-compatibili in materiali riciclabili e non nocivi per l'ambiente, dove l'innovazione riguarda la fase finale del ciclo di vita, cioè lo smaltimento del prodotto quando cessa di funzionare.

3.2 Indicatori dell'innovazione tecnologica

Uno dei fili conduttori del presente lavoro consiste nell'individuazione di indicatori tramite cui quantificare diversi aspetti nell'ambito progettuale e produttivo, pertanto risulta interessante elencare gli indicatori di innovazione tecnologica che più comunemente vengono riportati in letteratura.

Gli indicatori dell'innovazione tecnologica vengono classificati in due categorie [49]:

- *Indicatori dei fattori produttivi*: calcolano i fattori coinvolti nella produzione delle innovazioni tecnologiche e riguardano principalmente la quantità di risorse umane e finanziarie dedicate alle attività di ricerca e sviluppo
 - investimenti in R&S
- *Indicatori della produzione e dell'impatto*: sono finalizzati al calcolo dell'innovazione attraverso gli effetti dei risultati che produce.
 - statistiche sui brevetti
 - bilancia tecnologica dei pagamenti
 - statistiche sulle innovazioni (ricerche dirette)

- commercio di prodotti ad alta tecnologia
- indicatori della produzione scientifica

I più diffusi sono gli investimenti in R&S pur nel limite di non costituire l'unica fonte di innovazione, le statistiche sui brevetti, anche se non tutte le invenzioni vengono brevettate, e la bilancia tecnologica dei pagamenti che calcola i flussi finanziari a livello internazionale derivanti dalle transazioni dei diritti di proprietà intellettuale ed industriale, quali brevetti, concessioni, assistenza tecnica e know-how. In realtà in questo modo si escludono tutte quelle innovazioni tecnologiche che non rientrano in nessuna transazione commerciale o finanziaria e le innovazioni trasmesse all'interno di uno stesso paese e senza considerare che in realtà i trasferimenti di tecnologia diretti a paesi in via di sviluppo si riferiscono spesso a tecnologie consolidate da tempo.

Pur nelle limitazioni sopra espresse questi tre indicatori risultano i più efficaci, per quanto riguarda la misura dell'innovazione non è stata ancora individuata infatti ad oggi una metodologia rigorosa. Il commercio di prodotti ad alta tecnologia rappresenta un indicatore proposto di recente che richiede la non sempre facile classificazione dei prodotti a bassa, media e alta tecnologia. Gli indicatori della ricerca scientifica riguardano numero di pubblicazioni e citazioni e sono in realtà rappresentativi dello stato e delle prospettive della scienza, ma poco idonei al calcolo delle innovazioni tecnologiche.

Altri possibili indicatori di innovazione, raramente utilizzati in quanto non del tutto idonei allo scopo, sono gli stessi indici di produttività, basati sul principio che l'innovazione tecnologica migliora la produttività; gli investimenti di capitali, basati sull'ipotesi che i nuovi macchinari ed apparecchiature spesso implicano progressi tecnologici; e gli indici delle prestazioni industriali, che vengono proposti in quanto si ritiene che l'innovazione migliori la competitività delle aziende [46].

Esistono infine indicatori che consentono di valutare specifiche conseguenze dell'innovazione quali la dinamica tecnologica, quantificabile attraverso la misura della velocità con cui si diffonde l'innovazione dall'impresa che la attua all'impresa che la adotta o la percentuale di tutte le imprese che la adottano (tasso di diffusione dell'innovazione); la crescita di nuovi prodotti e di nuove industrie basate sulle principali innovazioni, in termini della crescita del valore assoluto del prodotto e delle vendite, o della percentuale del PIL (Prodotto Interno Lordo); l'influenza dell'innovazione sulla capacità produttiva, quantificabile come percentuale della

nuova capacità rispetto alla capacità totale; il tasso di crescita della produzione a seguito dell'innovazione o la quota percentuale del nuovo prodotto sulla produzione totale [46].

Nell'ambito di un'impresa manifatturiera gli indicatori di innovazione generalmente considerati sono [50]:

- risorse destinate alla ricerca e sviluppo
- spesa per la progettazione e prototipi
- spesa per macchinari e impianti legati alle innovazioni introdotte
- spesa per tecnologia non incorporata in macchinari e prodotti (brevetti, licenze, assistenza tecnica ecc.)

E' interessante notare che statisticamente in Italia sono molto più numerose le imprese che introducono solo innovazioni di processo rispetto a innovazioni di prodotto, in quanto il nostro paese ha una struttura economica caratterizzata da industrie e servizi tradizionali, in cui il cambiamento tecnologico è legato soprattutto all'introduzione di nuovi processi produttivi che puntano a ridurre i costi di produzione, mentre i prodotti restano gli stessi.

Altra misura che è importante fare nell'ambito di un'azienda che introduce innovazioni, è quella dell'effetto che queste producono. Tutti gli indicatori di efficienza ed efficacia aziendale trattati nel capitolo 2 possono essere utilizzati a tal fine: occorre calcolarli in differenti condizioni e processi, in diversi momenti dell'anno al fine di misurare l'evoluzione della prestazione dell'azienda e quindi l'efficienza/efficacia dell'innovazione o confrontare diversi processi produttivi e tecnologie in diverse imprese nello stesso momento per operazioni di benchmarking [51]. E' importante inoltre distinguere tra parametri che misurano la performance interna all'azienda di nuove tecnologie, sia dal punto di vista tecnico che economico e il vantaggio esterno che ne deriva (nell'ambito delle sfere socio-economica e strategica) che include i vari effetti provocati dalle innovazioni [52]. Sono stati introdotti indicatori specifici che possono fornire misure in merito alla innovazione, secondo i principi affermati, già citati nel relativo capitolo [40,41].

3.3 Diffusione e velocità di innovazione e complessità

Il valore dell'innovazione non è in grado da solo di determinarne il successo, l'impatto economico e sociale di nuovi prodotti e processi dipende dalla velocità con la quale si diffondono, cioè dalla accettazione da parte di potenziali utenti. La competitività nazionale e internazionale delle industrie, nel lungo periodo, dipende molto dalla loro abilità di recepire le modificazioni

tecnologiche. In realtà l'innovazione si diffonde con una velocità superiore a quella con cui l'impresa che la adotta e l'intero sistema economico sono in grado di assimilarla. Ciò significa che non sempre le innovazioni tecnologiche sono vantaggiose, in quanto per esserlo l'applicazione e la diffusione delle nuove tecnologie deve andare di pari passo con la crescita della capacità della imprese e del sistema economico di gestirle razionalmente ed economicamente [46].

Tutt'ora aperto è il dibattito riguardante la relazione tra dimensione delle imprese e velocità di diffusione dell'innovazione. Molti studiosi affermano che le imprese più grandi, dotate di una funzione R&S propria ed essendo più in grado di affrontare il nuovo investimento necessario per l'adozione dell'innovazione e di tollerare il rischio connesso, grazie alla maggiore disponibilità finanziaria, sia in termini di capitali propri che di finanziamenti pubblici, introducono le innovazioni più facilmente di quelle piccole. Viceversa le imprese piccole sono caratterizzate da una struttura gestionale più snella e in grado di prendere decisioni più rapidamente, quindi l'innovazione può essere recepita in tempi brevi. La conclusione alla quale si è giunti è che un'impresa di dimensione S introdurrà l'innovazione prima di una di dimensione $\frac{1}{2} S$, però, in rapporto a due imprese di dimensione $\frac{1}{2} S$, la più grande sarà più lenta, in media di almeno una delle due [46].

Ad oggi non esistono ricerche approfondite riguardanti il rapporto innovazione – complessità tecnologica. Gli unici aspetti affrontati da alcuni studiosi sono l'eventuale influenza della complessità sulla diffusione dell'innovazione, relativa all'adozione da parte di tutte le imprese del settore della nuova tecnologia e l'influenza sulla velocità di innovazione, intesa come tempo che intercorre tra l'adozione della nuova tecnologia e la commercializzazione del prodotto innovato.

Per quanto riguarda la velocità di diffusione dell'innovazione, è chiaro che la natura dell'innovazione influenza la sua diffusione. L'introduzione di una nuova tecnologia particolarmente complessa richiede in genere maggiori investimenti e un trasferimento di know-how più lungo e articolato rispetto ad una più semplice, il che giustifica anche intuitivamente tempi di diffusione più lunghi.

Alcune ricerche dimostrano che c'è un *legame tra il grado di complessità della nuova tecnologia e la velocità con cui si diffonde*. Barbiroli [46] sostiene che le innovazioni tecnicamente semplici e relativamente economiche tendono a diffondersi molto più rapidamente nei primi anni successivi alla loro prima applicazione commerciale, rispetto alle innovazioni più complesse e costose. Tuttavia, una volta trascorso lo scatto iniziale, si verifica che la diffusione

delle innovazioni del primo tipo (più semplici ed economiche, relativamente) rallenta con più evidenza; l'adozione al 100% (tutte le imprese del settore) sembra più probabile per le innovazioni del secondo tipo. Ciò è dovuto, in gran parte, al fatto che gli svantaggi competitivi nel non adottare le innovazioni minori sono forse meno significativi e possono essere nascosti dalle differenti produttività delle imprese [46].

Wonglimpiyarat [51] verifica tramite l'elaborazione e interpretazione di dati raccolti nel corso di interviste presso imprese che la complessità dell'innovazione non è correlata alla velocità dell'innovazione.

Allo scopo di misurare la complessità vengono sommati i valori di dieci indicatori relativi alle diverse fasi di vita del prodotto a ciascuno dei quali viene attribuito un valore da 1 a 5, crescente con l'aumento della complessità, nel corso di 71 interviste per diversi prodotti (materiali plastici e ceramici, computer, cellulari, automobili, aeroplani ecc.).

Gli indicatori sono i seguenti:

- *sviluppo*:
 1. difficoltà scientifiche o tecnologiche nel lavoro di sviluppo
 2. coordinamento della rete o interfaccia del sistema per l'implementazione dell'innovazione
 3. capitale di investimento dell'innovazione
 4. protezione brevettuale (strumenti legali)
- *consegna*:
 5. distribuzione del prodotto
 6. standardizzazione
- *mercato*:
 7. comprensione della domanda del cliente
 8. esistenza di flusso di entrate concorrenti
 9. attività di marketing relative all'innovazione
 10. incertezze di mercato.

Le 10 variabili sono individuate a partire da studi precedenti, in cui veniva dimostrato come questi fattori influissero sul successo o fallimento dell'innovazione i cui non veniva data indicazione circa una eventuale influenza diversa delle variabili, pertanto è ragionevole supporre che ciascuna abbia lo stesso peso sulla complessità dell'innovazione.

La complessità dell'innovazione determinata come somma dei fattori precedenti viene classificata in 5 livelli in base al punteggio totale calcolato come somma dei punteggi dei 10 fattori sopra citati in base alla tabella 3.1.

Le complessità vengono quindi confrontate con il numero di mesi/anni necessari per portare il prodotto innovativo commercializzato nel mercato.

I risultati dell'indagine confermano che le innovazioni caratterizzate da un alto livello di complessità non richiedono necessariamente un tempo più lungo per raggiungere la commercializzazione delle innovazioni con un livello di complessità più basso.

	LIVELLO	RANGE DI PUNTEGGIO
1	Bassissima complessità	0-10
2	Bassa complessità	11-20
3	Media complessità	21-30
4	Alta complessità	31-40
5	Altissima complessità	41-50

Tab. 3.1 Valori attribuiti ai diversi livelli di complessità [51]

3.4 Introduzione di innovazione e complessità

Altro interessante tema che correla complessità e innovazione è la *modalità con cui un'azienda gestisce e favorisce l'innovazione in relazione alla complessità di prodotti e tecnologie*.

Chapman e Hyland [52] sostengono che la complessità di singoli prodotti sempre più spesso richiede un elevato numero di progettisti, ingegneri, e manager di progetto che operano nell'ambito di un'azienda manifatturiera allargata su località geograficamente distribuite, secondo quella che è la tendenza attuale di internazionalizzazione e decentramento produttivo. Gli autori svolgono la propria ricerca focalizzando quattro tipi di complessità:

- complessità di *prodotto*
- complessità di *processo*
- complessità *tecnologica*
- complessità *dell'interfaccia cliente*

in cui per complessità tecnologica ci si riferisce alle “core technologies”, cioè alle tecnologie di prodotto o di processo che influiscono direttamente sul vantaggio competitivo dell’impresa, mentre la complessità dell’interfaccia cliente esprime il livello di difficoltà nell’interpretazione dei bisogni del cliente. Quando le aspettative del cliente sono chiaramente definite la complessità di interfaccia è bassa, quando tali aspettative sono più soggettive ed emozionali ed è difficile tradurle in specifiche tecniche, la complessità di interfaccia è alta.

L’indagine viene condotta ponendo ai manager di 70 imprese distribuite in Australia, Svezia, Irlanda, Italia, Olanda e Inghilterra quattro domande finalizzate a valutare su una scala Likert da 1 a 5 (allegato G) le quattro complessità sopra citate.

I dati sono riportati nella figura 3.1 e mostrano come gli andamenti presentano un picco per un valore tra 2 e 3 per tutti i primi tre tipi di complessità, mentre quella tecnologica ha una distribuzione con due picchi corrispondenti a 2 e a 4.

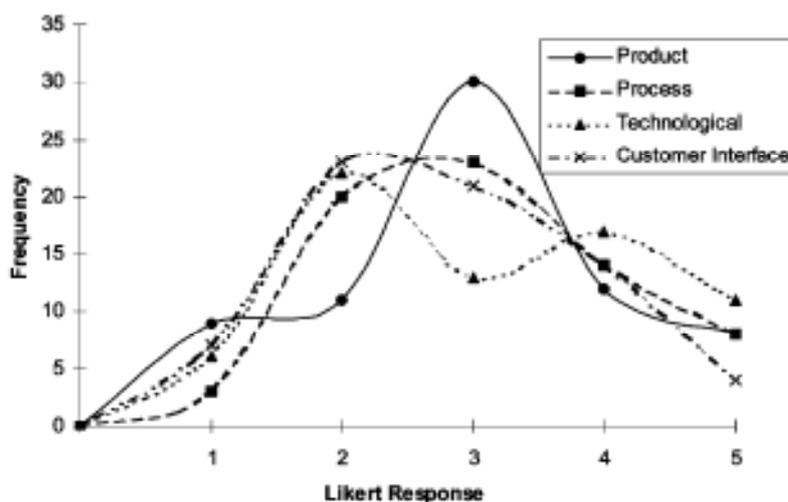


Fig.3.1 Distribuzione delle complessità delle 70 aziende intervistate [52]

I dati mostrano che esiste una tendenza nelle imprese dimensionalmente più grandi ad una maggiore complessità anche se imprese più piccole possono corrispondere sia a basse che ad alte complessità di prodotto e di processo.

Per quanto riguarda l’utilizzo di strumenti per favorire l’innovazione, le imprese ad alta complessità utilizzano in genere più strumenti di quelle a bassa complessità. Gli strumenti a cui ci si riferisce sono la pianificazione e il controllo di progetto, l’utilizzo di strumenti e metodi di progettazione, l’utilizzo di tecnologie computerizzate quali CAD, CAE, CAM, ecc.

Emerge pertanto un chiaro legame complessità – innovazione, che dimostra la superiorità competitiva delle imprese, in genere più grandi, in grado di gestire prodotti e tecnologie più complessi.

Ma come è possibile calcolare la *convenienza a introdurre un'innovazione* all'interno di un'azienda?

La convenienza a introdurre una nuova tecnologia dipende da una certa dimensione di efficienza minima al di sotto della quale l'utilizzazione di quella tecnologia non sarebbe ottimale e si misura in termini della correlazione aumento dei costi unitari/aumento della produttività.

Si dimostra che [46]:

$$C_{M \text{ minimo}} = 2\sqrt{C_T C_B R} \quad 3.1$$

in cui:

C_M costo unitario del prodotto

C_T costo di trasformazione ammortizzato

C_B prezzo unitario delle risorse

R consumo unitario di risorse riferito ad una unità di impianto

con:

$$R = \frac{BA}{Q^2}$$

in cui:

B quantità di risorse impiegate in un anno

A unità di impianto annue utilizzate

Q quantità prodotta in un anno

con:

$$C_M = C_R + C_L$$

in cui:

C_R costo unitario delle risorse impiegate

C_L costo unitario di lavorazione

con:

$$C_R = C_B R \frac{Q}{A}$$

e

$$C_L = C_T \frac{A}{Q}$$

in cui il rapporto Q/A rappresenta la produttività dell'impianto.

L'equazione 3.1 dimostra che diminuzioni anche relativamente rilevanti dei costi di impianto e di trasformazione C_T e dei costi delle risorse C_B hanno effetti relativamente modesti sul costo del prodotto finale.

L'andamento è chiaramente rappresentato in figura 3.2: quando il progresso tecnologico è spinto eccessivamente, almeno in un determinato momento, un ulteriore aumento di produttività comporta un aumento del costo unitario dei prodotti.

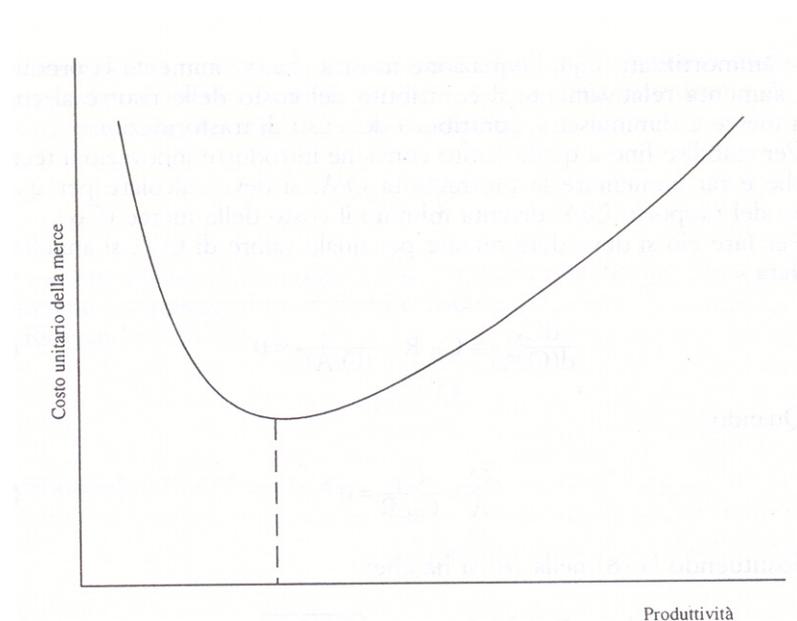


Fig.3.1 Andamento del costo unitario di un prodotto in funzione della produttività [46]

Naturalmente a fianco di queste considerazioni prettamente economiche, vengono fatte in realtà anche considerazioni strategiche che possono talvolta portare ad introdurre una nuova tecnologia anche qualora questa non porti a un incremento di produttività e contemporaneamente ad un calo di costi di produzione.

I motivi principali per cui può essere opportuno introdurre una nuova tecnologia sono gli aumenti della qualità e delle funzionalità del prodotto, in questi casi il cliente può essere disponibile ad acquistare il prodotto a prezzo più elevato e quindi l'aumento del costo di produzione può essere direttamente coperto dal prezzo.

Sono diversi gli autori che focalizzano il rapporto tra innovazione e complessità di progetto inteso non tanto nel senso di design di prodotto, alla cui complessità verrà dedicato l'intero paragrafo 8.1 data l'importanza che riveste nel processo di sviluppo del prodotto, ma dal punto di vista della organizzazione e struttura aziendali. Si riporta di seguito una selezione di due contributi che si collocano nell'ambito di tale approccio.

Mohan V.Tatikonda e Stephen Rosenthal [53] definiscono il legame tra la novità della tecnologia (innovazione) e la complessità di progetto, correlando questo concetto anche alla performance e al costo. Gli obiettivi centrali del progetto di sviluppo di un prodotto dal punto di vista della performance tecnica, intesa come funzionalità e qualità del prodotto, sono: costo dell'unità di prodotto, time-to-market e, valutando la performance individuale, il grado di raggiungimento di ciascun obiettivo e per quella totale, il grado di raggiungimento della combinazione dei tre obiettivi.

La *complessità di progetto* viene definita come la natura, quantità e magnitudine delle sotto-funzioni organizzative e delle loro interazioni.

In particolare vengono definite tre caratteristiche della complessità di progetto:

- interdipendenza delle unità di funzione (interdipendenza tecnologica)
- novità degli obiettivi di funzione (novità di obiettivo)
- livello richiesto di performance della funzione (difficoltà di progetto).

Queste caratteristiche vengono correlate alla complessità di progetto attraverso una indagine svolta presso 57 aziende per un totale di 120 progetti giungendo a interessanti conclusioni:

- la gestione di una novità di tecnologia di processo appare più problematica di una novità di tecnologia di prodotto in quanto ha un legame negativo con il time-to-market.

- la complessità di progetto non ha legami con il successo dello svolgimento totale dello stesso, bensì con una sola specifica dimensione degli output: il costo per unità di prodotto
- non esistono effetti dovuti all'interazione tra l'innovazione tecnologica e la complessità del progetto.

E' dedicato alla complessità dell'organizzazione aziendale lo studio di *Fariborz Damanpour* [54] che approfondisce la relazione tra complessità organizzativa e innovazione organizzativa.

L'autore fornisce alcune significative e utili definizioni:

Innovazione organizzativa: adozione di una nuova idea o comportamento nell'organizzazione adottante.

Complessità organizzativa: comprende due aspetti: la complessità strutturale e la dimensione dell'organizzazione.

La complessità strutturale viene definita e misurata in differenti modi, per esempio, come il numero di stazioni in cui il lavoro è eseguito così come il numero di attività o servizi svolti, o il numero di gradi gerarchici che effettuano differenti compiti. E' possibile definire quattro dimensioni di differenziazione nelle organizzazioni, spaziale, occupazionale, gerarchica, e funzionale, il grado di complessità strutturale è spesso indicato dalla estensione di differenziazione lungo queste quattro dimensioni.

I risultati della ricerca portano a concludere che la complessità strutturale è in genere positivamente associata alla innovazione.

Mike Hobday [55] definisce prodotti e sistemi complessi (CoPS) quelli che richiedono una forte innovazione e pertanto elevati costi di sviluppo, sostenendo che la natura di un prodotto, soprattutto in termini di complessità e di costo, determinano un importante ruolo nella definizione dei processi innovativi e dell'organizzazione dell'impresa. In genere i prodotti più semplici vengono fabbricati in grandi quantità standardizzate, mentre i CoPS sono in genere prodotti in piccoli lotti e personalizzati al cliente. E' ipotizzata una continuità della complessità di prodotto dall'oggetto molto semplice, attraverso vari livelli intermedi fino al prodotto più articolato e costoso. Vengono definite alcune componenti della complessità tra cui

- novità tecnologica
- customizzazione dei componenti
- architettura e gerarchia del prodotto

- percorsi alternativi di progettazione
- varietà di conoscenza e abilità richieste per la produzione
- incertezza dell'informazione

E' interessante pertanto notare come *l'innovazione venga considerata come una delle principali cause della complessità.*

Molti degli autori che analizzano la correlazione complessità - innovazione sottolineano l'importanza anche della *correlazione complessità-costo*, visto che il costo è evidentemente proporzionale alla complessità. E' chiaro infatti che un prodotto innovativo comporta delle spese di ricerca e sviluppo rispetto ad uno già consolidato.

Uno dei lavori più significativi pubblicati a questo proposito risale al 1995 ad opera di *William W.Cooper, Kingshuk K.Sinha e Robert S.Sullivan* [56]. Gli autori definiscono una vera e propria nuova unità di costo che tiene conto degli incrementi di complessità delle operazioni in presenza di continui e rapidi cambiamenti nei prodotti e nelle tecnologie di processo. L'utilizzo di questo parametro è quello di consentire la analisi delle prestazioni passate e presenti dell'impianto di produzione a partire dai costi storici e proiettarle nel futuro anche in presenza simultanea di ulteriori cambiamenti tecnologici.

L'Unità di costo è definita in riferimento alla fabbricazione di wafer di silicio per l'industria elettronica, considerati tra i prodotti più complessi da costruire, in termini di:

$$TNDE = 5,87 \times 10^{-8} (DMATL)^{0,829} \times (GCHEM)^{2,53} \times (MAINT)^{1,08}$$

in cui

TNDE è il Total Net Die Equivalent, cioè il costo relativo a progetto, tecnologie di processo usate per la fabbricazione e tempi di ciclo di lavorazione, cioè a tutta la progettazione-fabbricazione del prodotto

DMATL è il costo diretto del materiale

GCHEM è il costo del gas e degli agenti chimici

MAINT è il costo della manutenzione preventiva e di quella dovuta a rotture

Gli esponenti vengono determinati sperimentalmente consentendo la convergenza della formula verificata nel caso di una azienda produttiva del settore di riferimento.

Innovazione, complessità e costo sono quindi certamente correlati, occorre pertanto tenere conto di questa conclusione al fine di impostare correttamente qualsiasi metodologia di calcolo dell'indice di complessità.

4. TRASFERIMENTO TECNOLOGICO E COMPLESSITA'

4.1 Internazionalizzazione e trasferimento tecnologico

Una delle potenziali applicazioni più interessanti di una misura di complessità tecnologica è il Trasferimento di Tecnologia (T.T.), in particolare nell'ambito di operazioni industriali di internazionalizzazione.

Per *internazionalizzazione* di una impresa si intende l'entrata della stessa in mercati internazionali attraverso la realizzazione di accordi con imprese locali o la creazione in loco di una rappresentanza commerciale o di una sede produttiva.

L'internazionalizzazione, considerata in passato dominio esclusivo di grandi società, è ormai diventata comune anche nell'ambito delle Piccole Medie Imprese dei paesi più industrializzati, in quanto costituisce un elemento strategico per il loro successo.

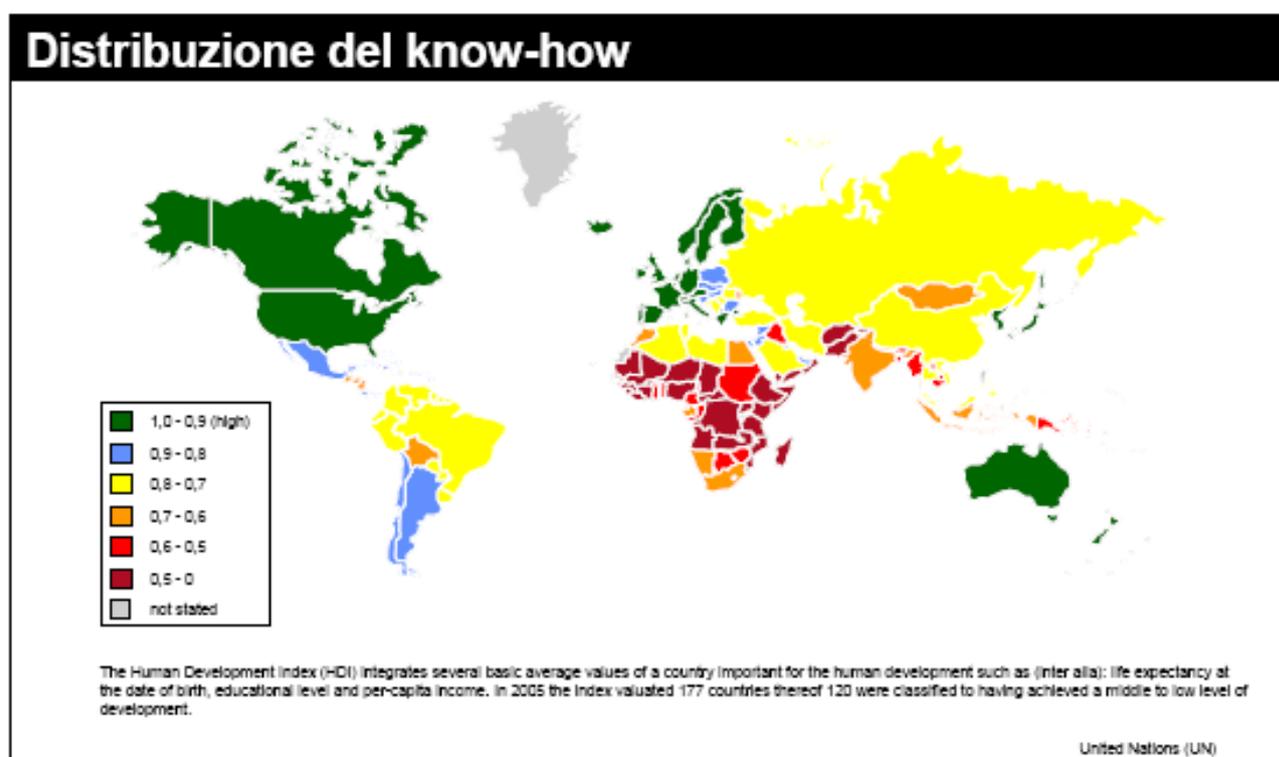


Fig.4.1 Distribuzione mondiale del know-how [Perrone, Scuola AITeM 2007]

I vantaggi che l'internazionalizzazione porta ad una PMI sono:

- riduzione dei costi di produzione, producendo in paesi dove il costo della mano d'opera è più basso. Al contrario della grande impresa la PMI non può infatti sfruttare il fattore economia di scala per ridurre il costo del prodotto.
- penetrazione di mercati lontani, diversamente difficilmente accessibili, sia in termini commerciali (barriere doganali, difficoltà di contatti, scarsa conoscenza della realtà locale ecc.) che in termini di assicurazione del servizio post-vendita, fondamentale per il successo di un prodotto, tanto più se con elevato contenuto tecnologico.
- reperimento di risorse naturali e materie prime con maggiore facilità e a prezzi più ridotti se si orienta in modo opportuno la scelta del paese
- mantenimento di flessibilità, nonostante l'acquisizione di una maggiore dimensione produttiva.

Esiste un *legame tra internazionalizzazione e innovazione*, argomento trattato nel precedente capitolo. Alcune ricerche dimostrano che le quote di mercato internazionale sono strettamente correlate alla capacità innovativa dell'industria [57,58]. Pertanto quanto più un'industria è innovativa tanto più tenderà a internazionalizzarsi, realizzando propri stabilimenti produttivi all'estero o stipulando accordi industriali e attuando relativi trasferimenti di tecnologia. Si può pertanto concludere che gli attori del T.T. sono in genere imprese innovative, che investono una consistente percentuale del proprio fatturato in ricerca e sviluppo e che spesso detengono un numero significativo di brevetti.

La scelta di realizzare accordi con imprese di paesi del secondo o terzo mondo implica la necessità di un *trasferimento tecnologico*, cioè del passaggio di conoscenze, patrimonio intellettuale e know how relativi alla progettazione e fabbricazione di un prodotto, all'applicazione di un processo produttivo o alla prestazione di un servizio dalla casa madre alla sede produttiva decentrata.

Il Trasferimento di Tecnologia è il ricollocamento di proprietà intellettuale, processi o know-how da una sorgente a un ricevente [59] e si riferisce propriamente ad una innovazione, cioè ad una tecnologia che trova già una sua applicazione industriale e commerciale, il che giustifica ulteriormente il legame esistente tra internazionalizzazione e innovazione. La casa madre e in generale l'ente di origine della tecnologia viene denominato *Transferor* e l'ente destinatario *Transferee*.

Un T.T. comporta per l'impresa più sviluppata il rischio di vedere l'impresa ricevente trasformarsi, una volta acquisita la tecnologia, in un concorrente, ma, curando con attenzione gli

aspetti legali contrattuali e in considerazione dei vantaggi sopra elencati, il trasferimento di tecnologia costituisce una pratica attualmente diffusa e conveniente.

La crescita della produzione globale è stata particolarmente rapida negli ultimi anni e il trasferimento di tecnologia internazionale, realizzato con la produzione attraverso le frontiere, è oggi visto come un mezzo efficace per accedere a mercati e risorse stranieri. I trasferimenti sono efficaci nella misura in cui: (1) sono istituzionalizzati e (2) aggiungono valore [60].

4.2 Modelli di Trasferimento Tecnologico

Nel caso di internazionalizzazione il buon esito di un'operazione di T.T. non dipende solamente dal modo in cui il trasferimento viene attuato, ma dalle condizioni dell'impresa ricevente, non solo interne, quanto anche riferite al contesto industriale e sociale in cui opera. Infatti talvolta si può presentare un gap notevole tra la tecnologia che si vuole trasferire e la reale situazione in cui tale tecnologia dovrà operare. E' opportuno trasferire le tecnologie che mostrano la deviazione minima tra i bisogni e le capacità del Transferee.

I principali fattori da valutare al proposito sono:

- disponibilità di materie prime
- disponibilità di lavoratori
- disponibilità di componentistica industriale (eventuale presenza di fornitori di I° livello in grado di fornire gruppi di componenti completi, co-progettando insieme all'azienda madre il prodotto)
- condizioni dei subfornitori
- infrastruttura industriale disponibile
- possibilità di reperire mano d'opera specializzata

Ad oggi non è ancora disponibile un modello univoco di Trasferimento Tecnologico sulla base del quale impostare operazioni di T.T. Sono state comunque proposte diverse soluzioni ed elaborati alcuni software a supporto del management che deve pianificare un T.T.

Si riportano di seguito i modelli più significativi:

1. *Moto Browniano* (1994) [61]

La tecnologia da trasferire viene assimilata ad una particella sospesa in un mezzo che rappresenta il contesto socioeconomico in cui la tecnologia viene trasferita e sviluppata. Barriere e facilitatori sono rappresentati nel modello dai bombardamenti delle molecole sulla particella come

rappresentato in figura. Il T.T. diventa significativo quando la particella raggiunge la massa critica il che corrisponde al momento in cui aumentano pertanto gli investimenti e la capacità di assimilazione della tecnologia da parte del Transferee.

Sulla base di questa metodologia sono stati realizzati dei sistemi esperti per valutare l'impatto e l'influenza reciproca degli elementi che concorrono a creare massa, cioè delle barriere e dei facilitatori da cui si possono ottenere importanti indicazioni su come guidare il processo.

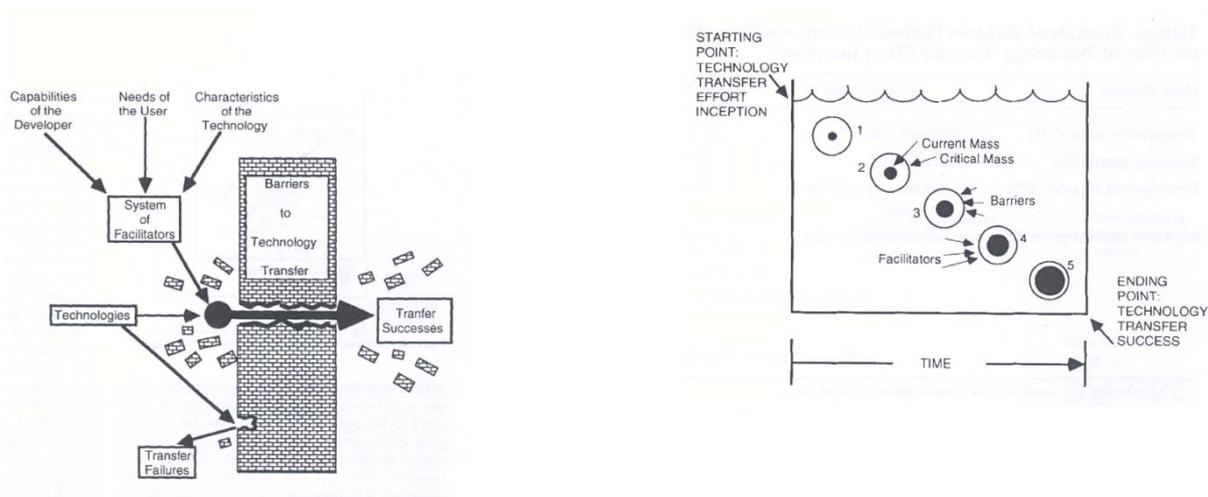


Fig.4.2: rappresentazione grafica del modello del moto Browniano [61]

2. *Copy exactly* (1997) [62]

Il trasferimento di tecnologia dalla R&D alla produzione o ad altro stabilimento offre una opportunità unica per introdurre miglioramenti ai macchinari e ai processi, questo però implica rischi connessi alla mancata esperienza.

Obiettivo di questa metodologia è quindi riprodurre semplicemente in modo esatto tutte le condizioni che influiscono sul processo, la nuova installazione deve essere una copia identica della vecchia per evitare sorprese e eventuali miglioramenti verranno affrontati in un secondo tempo.

3. *Process Warehouse* (2000) [63]

Si tratta di un database contenente sotto forma di una semplice matrice le informazioni sugli aspetti significativi della tecnologia da trasferire. Il database costituisce una guida per lo sviluppo del processo e una fonte di know how tecnico, questa metodologia viene utilizzata in particolare nel settore software.

4. *Modello dinamico* Jayaraman, M. Bhatti, H.Saber (2004) [64]

Si tratta di un buon strumento decisionale per pianificare un processo di Technology Transfer utilizzando un modello matematico che descrive la funzione di T.T. fornendo in particolare l'andamento nel tempo della funzione indice di trasferimento tecnologico e consentendo considerazioni quantitative quali la determinazione dei potenziali di T.T.

La velocità di assorbimento di tecnologia di un paese ricevente durante un T.T. consiste secondo il modello di due contributi derivanti da:

- sforzi di sviluppo indigeni del *Transferee*
- T.T. dal paese di origine (*Transferor*)

E' quindi definibile una funzione $\phi(t)$ che governa il T.T. la cui velocità è proporzionale al livello di tecnologia esistente nel *Transferee* al tempo t e al livello di trasferimento tecnologico che resta raggiungibile a lungo termine.

$$\frac{df(t)}{dt} = \phi(t)f(t)[F - f(t)]$$

in cui:

$f(t)$ livello di assorbimento di tecnologia esistente in una certa industria/paese al tempo t

F massimo livello di assorbimento di tecnologia raggiungibile nell'industria/paese nel lungo termine

Si definisce Gap di tecnologia la differenza tra il livello tecnologico del *Transferor* e quello del *Transferee* che rappresenta le risorse aggiuntive disponibili per il paese ricevente durante il T.T.

Il T.T. si sviluppa attraverso tre fasi:

- *Fase iniziale:*
 - - massimo gap
 - - limitata capacità di assorbimento del *Transferee*
 - velocità di assorbimento della tecnologia ridotta da parte del *Transferee*
- *Fase di apprendimento:*
 - - sviluppi indigeni indotti dagli sforzi di T.T.
 - - velocità di assorbimento del *Transferee* in crescita in relazione a risorse indigene, risorse esterne disponibili e velocità di T.T.
- *Terza fase:*

- - gap ridotto
- - risorse indigene del *Transferee* potenti
- risorse esterne disponibili per il trasferimento ridotte
- velocità di T.T. in diminuzione

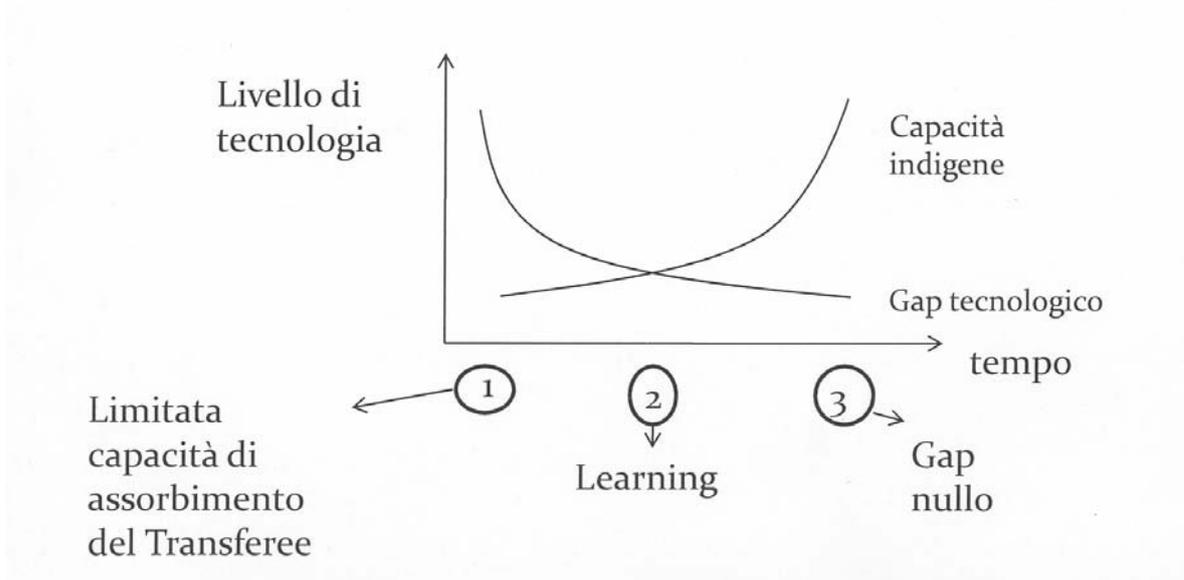


Fig.4.3 Andamento del T.T. in funzione del tempo rispetto alle capacità indigene e al gap tecnologico [64].

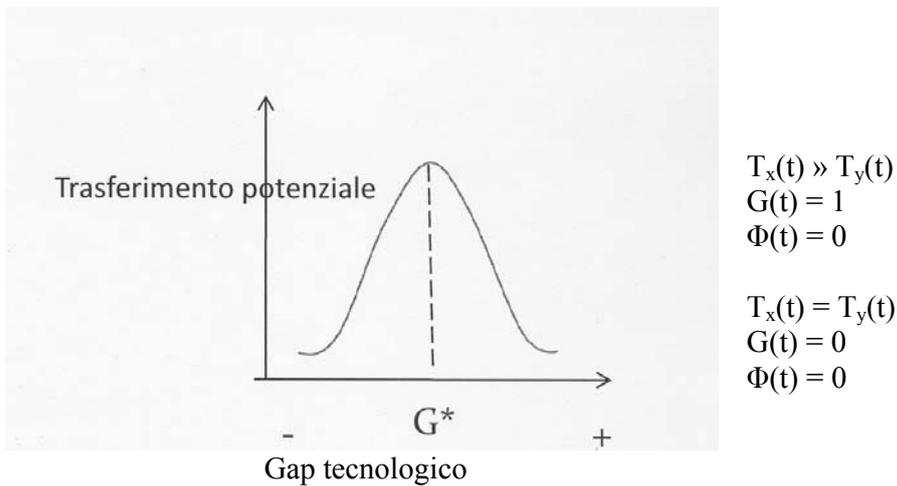


Fig.4.4 andamento del T.T. in funzione del tempo rispetto alle capacità indigene e al gap tecnologico [64].

Il potenziale trasferimento di tecnologia raggiunge pertanto un massimo in corrispondenza di un valore ottimale del gap e la velocità di T.T. decade esponenzialmente all'aumentare della distanza potenziale tecnologica tra Transferor e Transferee come si evince in fig.4.4.

La funzione $\phi(t)$ è esprimibile come:

$$\phi(t) = e^{-D(t)}G(t)$$

in cui:

$D(t) = \frac{T_x(t)-T_y(t)}{T_y(t)}$ è la potenziale distanza tecnologica tra Transferor e Transferee al tempo t

$T_x(t)$ livello tecnologico del Transferor al tempo t

$T_y(t)$ livello tecnologico del Transferee al tempo t

$G(t)$ è il gap tecnologico tra Transferor e Transferee

Il livello tecnologico viene misurato in termini di un indice tecnologico calcolato per ogni industria/paese tramite il metodo dell'analisi dei fattori a partire da:

fattori di condizione tecnologica nazionale:

- prodotto interno lordo pro-capite in PPP
- prodotto interno lordo per popolazione economicamente attiva
- consumo energetico pro-capite

fattori di condizione tecnologica produttiva:

- valore aggiunto per output nel settore manifatturiero
- valore aggiunto per impiegato nel settore manifatturiero in PPP

fattori di condizione tecnologica della specifica industria:

- valore aggiunto per output nella industria delle macchine utensili
- valore aggiunto per impiegato nella industria delle macchine utensili in PPP

che vengono rilevati attraverso fonti quali l'United Nations Industrial Statistics Year Handbook.

Attribuendo un peso a ciascun fattore viene calcolato l'indice tecnologico del settore industriale in ciascun paese selezionato ed è pertanto possibile tramite la funzione $\phi(t)$ prevedere l'andamento del Technology Transfer.

5. **Fuzzy ANP** (2006) [65]

Consente una *valutazione* del trasferimento di tecnologia tenendo conto dell'incertezza nelle decisioni umane, determinando i *fattori critici* del processo di Technology Transfer. La tecnica Fuzzy verrà più dettagliatamente descritta nel capitolo 6 dedicato all'intelligenza artificiale.

Punto focale di questa metodologia è la selezione dei criteri per realizzare un T.T. con il metodo Delphi(vedi allegato G). Il problema viene scomposto in una serie di livelli (relazioni

acquirente-fornitore, trasferimento della tecnologia, management della conoscenza ecc.) e vengono individuate le loro dipendenze. Il questionario viene pertanto elaborato in base ai livelli definiti e quindi somministrato agli esperti. I risultati vengono infine aggregati attraverso la tecnica Fuzzy individuando i criteri significativi.

La tecnica Fuzzy fornisce una cornice matematica rigorosa in cui possono essere studiati fenomeni concettualmente vaghi, consentendo di risolvere quei problemi in cui l'incertezza è dovuta all'assenza di criteri definiti nettamente piuttosto che alla presenza di variabili casuali. Pertanto si presta bene al caso del trasferimento di tecnologia in cui viene attribuito un numero fuzzy triangolare come peso delle diverse opinioni di esperti sui differenti criteri che influiscono sul Technology Transfer e vengono quindi elaborati i dati fino ad ottenere un unico peso rappresentativo delle opinioni di tutti gli esperti per ciascun criterio. Il numero Fuzzy è triangolare nel senso che l'esperto risponde alla domanda fornendo anziché un valore unico, un range di possibili valori che esprimono il proprio giudizio, se per esempio la risposta è (2,5,7) significa che è contenuta nel range 2-7 con valore più probabile 5.

4.3 Utilizzo della complessità nei trasferimenti di tecnologia

L'internazionalizzazione delle imprese in diversi paesi ha determinato nuove istanze:

- condivisione delle informazioni in tempo reale
- frammentazione della produzione
- progettazione modulare del prodotto

Le nuove tecnologie IT consentono di realizzare reti di e-design e di e-manufacturing in cui progettisti e industrializzatori condividono le informazioni relative al progetto e alla fabbricazione del prodotto attraverso Internet o altri strumenti di telecomunicazione.

La frammentazione della produzione può avvenire in maniera verticale o orizzontale: nel primo caso l'impresa costruttrice delocalizza una fase del processo produttivo in uno stabilimento diverso da quello della casa madre, mentre nel secondo duplica l'intero processo produttivo fabbricando completamente il prodotto finale in sedi diverse.

Nel caso di internazionalizzazione verticalizzata l'impresa concentra ogni attività nel paese in cui è più conveniente. Per farlo deve progettare in forma modulare il proprio prodotto scomponendolo in diversi gruppi e sotto-gruppi ed individuare dei fattori (mano d'opera, materie prime ecc.) che siano particolarmente favorevoli nelle diverse sedi consentendo di operare la scelta ottimale.

E' in questo contesto che *occorre disporre di indicatori, in particolare quello relativo alla complessità, che permettano in modo univoco e inequivocabile di individuare come organizzare la rete produttiva scegliendo cosa produrre e dove.*

Il legame tra trasferimento di tecnologia e complessità tecnologica è forte ed evidente: tanto più è elevata la complessità della tecnologia da trasferire tanto più il Technology Transfer sarà difficile da realizzare e lo sarà tanto più se l'industria ricevente è in condizioni tecnologicamente arretrate. L'indice di complessità tecnologica può rappresentare pertanto un importante supporto ai fini di valutare la fattibilità di un T.T. e di scegliere l'impianto produttivo più adatto.

Ad oggi tutte le imprese che adottano la strategia dell'internazionalizzazione scelgono lo stabilimento produttivo in cui fabbricare i propri prodotti sulla base dell'esperienza e di considerazioni principalmente di tipo commerciale e comunque senza disporre di strumenti rigorosi adeguati.

Un'idea può essere quella di confrontare l'indice di complessità di prodotto con l'indice tecnologico di un'industria/paese (modello 4) così da *valutare la convenienza a fabbricare in un determinato impianto* ubicato in un certo territorio. Il secondo indice infatti tiene conto delle infrastrutture industriali e della rete di fornitura dell'area dell'impianto consentendo una valutazione rigorosa di tali aspetti.

Altra importante scelta che può essere supportata dalla disponibilità di un indice di complessità di prodotto è quella di *quali componenti fabbricare presso lo stabilimento produttivo decentrato*. Al momento queste decisioni vengono prese sulla base di considerazioni dettate dall'esperienza dei tecnici e degli ingegneri responsabili della produzione e mancano totalmente di una base rigorosa: di fatto è in genere proprio la complessità del prodotto a determinare la sua fabbricabilità o meno presso lo stabilimento produttivo e quindi la sua quantificazione può consentire di operare questo tipo di scelta in modo automatico e con minori possibilità di errore.

L'esempio riportato in allegato E relativo alla internazionalizzazione in Cina di una nota impresa di macchine automatiche bolognese, è estremamente rappresentativo in tal senso.

Si tratta di una scelta non solo tecnica ma strategica: realizzare componenti complessi implica un massiccio trasferimento di tecnologia dalla casa madre all'industria satellite che, al di là degli aspetti economici, può non essere conveniente in termini strategici in quanto implica una perdita di controllo da parte della casa madre sulla tecnologia trasferita. Potere pertanto condurre queste scelte sulla base non solo di esperienza e intuizione ma di dati oggettivi risulta particolarmente importante.

5. LA COMPLESSITA' TECNOLOGICA

5.1 L'approccio alla complessità

E' già stata sottolineata la multidimensionalità di un sistema manifatturiero e l'importanza della scelta degli indicatori di processo in relazione al tipo di sistema produttivo. Anche la complessità va considerata come multidimensionale in quanto riferibile a diversi aspetti e fasi del processo di sviluppo e fabbricazione di un prodotto.

Il panorama dell'industria elettromeccanica moderna è estremamente variegato: si parla di milioni di prodotti diversi, nella produzione dei quali sono coinvolte milioni di persone. In una situazione di questo tipo la possibilità di identificare i prodotti attraverso un indice che ne inquadri in maniera univoca il grado di complessità risulta di estrema utilità per mettere in relazione la capacità produttiva dell'azienda ai prodotti che man mano il mercato richiede.



Fig.5.1 Esempi di prodotti industriali di diverso livello di complessità tecnologica

Nella figura sono rappresentati diversi oggetti. La complessità delle vanghe è limitata in quanto sono fabbricate in maniera semplice, prevedendo un manico in legno e una parte in acciaio lavorata per stampaggio e tranciatura, al limite può essere presente una stampella metallica per l'appoggio del piede dell'operatore. La semplicità caratteristica di questi prodotti è evidenziata ulteriormente dalle ampie tolleranze richieste dal progetto, sia per quanto riguarda gli accoppiamenti manico-pala, sia per quanto riguarda le dimensioni e le geometrie.

Gli utensili per il taglio sono manufatti concettualmente simili ai precedenti, ma con un utilizzo applicativo non più manuale, ma come componenti di macchine più o meno automatizzate. Il grado di complessità tecnologica in questo caso, pur rimanendo in assoluto limitato, è maggiore del precedente. Dovendo essere montati su macchine automatiche questi componenti necessitano di tolleranze negli accoppiamenti molto più strette ed essendo destinate ad un carico di lavoro molto più gravoso e continuativo saranno certamente realizzati in materiali meccanicamente più performanti e prevedranno parti affilate, realizzate per asportazione di truciolo, e magari anche trattate termicamente per resistere meglio all'usura. Tutte queste caratteristiche determinano un ciclo di lavorazione molto più articolato di quello del caso precedente e che nel quale verranno utilizzate macchine più tecnologicamente avanzate.

E' quindi rappresentata una macchina a Controllo Numerico Computerizzato. Tale prodotto naturalmente è caratterizzato da una complessità tecnologica enormemente maggiore rispetto ai casi precedenti, anche considerando il fatto che, per dare precisioni al centesimo di millimetro alle lavorazioni effettuate, i suoi componenti devono essere realizzati con tolleranze almeno di un ordine di grandezza superiore. Inoltre la costruzione di particolari meccanici che richiedono precisioni dell'ordine del micron vanno realizzati in ambienti a temperatura e umidità controllate e la ditta che li produce deve dominare tutte le tecnologie necessarie per misurare e testare tali componenti.

Al fine di comprendere e definire la complessità è importante sostituire all'approccio cartesiano un approccio sistemico.

Il pensiero sistemico configura un nuovo modo di concepire la realtà, attraverso i concetti di connessione, relazione e contesto. Secondo la visione sistemica le proprietà essenziali di un sistema sono proprietà del tutto, che nessuna delle parti possiede. Esse nascono dalle interazioni e dalle relazioni tra le parti. Tali proprietà vanno distrutte quando il sistema viene sezionato in elementi isolati. A loro volta le diverse parti, anche se singolarmente identificabili, non sono tra di loro isolate, in quanto la natura del tutto differisce dalla somma delle sue parti, comprendendo al

suo interno le specifiche relazioni ed interazioni tra le stesse. E' su queste basi che bisogna definire la complessità, questo approccio verrà approfondito nel capitolo 7 (paragrafo 7.3) relativo al calcolo della complessità tramite i sistemi esperti.

CARTESIANO	SISTEMICO
riduzione: l'analisi dell'oggetto si effettua attraverso l'analisi delle singole parti	olismo: l'oggetto va analizzato come un tutto immerso in un ambiente esterno
considera la natura delle interrelazioni	considera i suoi effetti
si modifica solo una variabile alla volta	si modificano gruppi di variabili in modo simultaneo
si basa sulla precisione dei dati	si basa su una percezione globale
i fenomeni sono considerati reversibili, senza considerare il fattore tempo	integra nell'analisi il tempo e la irreversibilità
modelli precisi e dettagliati, di difficile utilizzazione nella pratica	modelli poco rigorosi che servono come base di conoscenza, si utilizzano come supporto alla presa di decisioni
mono-disciplina	interdisciplinarietà
visione statica	visione dinamica

Tab.5.1 Approccio cartesiano e sistemico a confronto

Se ci riferiamo ad un sistema produttivo il modello attuale sostituito a quello classico di Taylor si basa sull'idea di una produzione che deriva dall'integrazione di diverse macchine, funzioni e operatori, in continua evoluzione e difficilmente interpretabile e prevedibile è [66].

TAYLOR	MODELLO ATTUALE
sistema in equilibrio facile da interpretare	sistema imprevedibile e dinamico complesso
netta divisione lavoro e operazioni	integrazione di macchinari e risorse
layout di impianto lineare	layout di impianto complesso
fisica classica, matematica precisa	similitudine con sistema biologico, teoria del caos

Tab.5.2 Il modello di Taylor e il modello attuale di un sistema produttivo a confronto

La complessità di un sistema manifatturiero va definita riferendosi al modello dinamico attuale, sostituendo a matematiche precise la ricerca di leggi non più deterministiche in grado di spiegarne il funzionamento, ricercando similitudini con la biologia e l'evoluzione caotica dei sistemi. E' su queste considerazioni che si pensa ad un utilizzo dell'Intelligenza Artificiale per il calcolo della complessità (capitolo 6) e si basano i modelli entropici di calcolo della complessità che di seguito verranno esaminati (capitolo 7, paragrafo 7.4).

Questa nuova interpretazione si deve *Janez Peklenik* che nel 2005 in "Complexity and Emergence of work systems in manufacturing" [66] ricerca un nuovo paradigma che sostituisca il classico modello di Taylor basato sulla divisione delle operazioni e del lavoro. e fornisce importanti indicazioni circa la misura della complessità.

La produzione, fin'ora considerata una scienza empirica e relativamente semplice, viene ora riconosciuta come scienza complessa.

Il sistema produttivo è costituito da tanti blocchi definiti sistemi di lavoro elementare EWS (Elementary Work System). Ogni EWS è l'unità più piccola capace di implementare un processo richiesto nella fabbricazione di prodotti discreti.

Una singola macchina è definita dal suo sistema di posizionamento P, un sistema cinematico K e il sistema di trasmissione dell'energia E. L'intero sistema ha controllo ad anello come mostrato in fig.5.2. Le macchine attualmente utilizzate nell'industria manifatturiera variano dalle CNC, DNC a quelle a controllo adattativo e il modello di Peklenik nella sua semplicità è applicabile ad ognuna di esse.

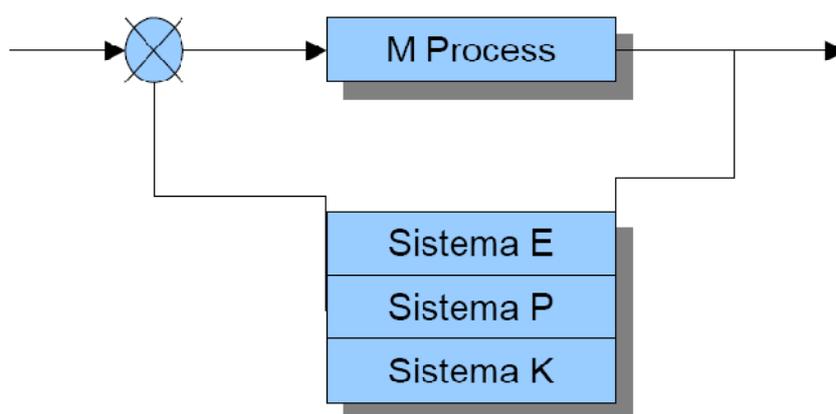


Fig.5.2 Schema della macchina di produzione di Peklenik [66]

Gli oggetti che vengono controllati in un sistema produttivo sono:

- processi

- macchine
- interfacce uomo-macchina

tutti caratterizzati da proprietà molto complesse, così come complessa è la loro integrazione.

Peklenik definisce diversi livelli gerarchici di macchina e sistemi produttivi che vengono riportati in allegato C e che sono utili ai fini di comprendere le diverse definizioni di complessità che verranno di seguito fornite.

Per spiegare il concetto di complessità in produzione l'autore fornisce l'esempio di un utensile per la lavorazione, per il quale temperature e forze di natura stocastica e dipendenti dal tempo influenzano l'accuratezza delle parti così come la prestazione e la stabilità del sistema. L'utensile può presentare difetti nella superficie di contatto, quali errori dimensionali e di forma e possono insorgere eventi esterni non prevedibili che influenzano il risultato del lavoro. La complessità si esprime pertanto attraverso il comportamento non stazionario e la difficoltà a realizzare gli obiettivi voluti.

Un oggetto complesso in produzione quindi è caratterizzato dai seguenti aspetti:

- assenza di una matematica formale che descriva l'oggetto
- proprietà stocastiche distinte dell'oggetto
- comportamento non stazionario durante le operazioni
- riluttanza dell'oggetto ad essere controllato
- deviazioni significative nella misura dei dati sotto le stesse condizioni operative, non riproducibilità dei risultati.

Al fine di valutare la complessità del sistema produttivo occorre considerare anche il soggetto che svolge e controlla le operazioni, cioè il fattore umano la cui competenza può essere descritta come una somma di conoscenza ed esperienza. Inoltre sono da valutare ulteriori abilità connesse al carattere, educazione, addestramento e mansione nella azienda. Viene proposta una metodologia basata sulla somministrazione di questionari che consente di assegnare un valore numerico alla competenza individuale che può variare da 1 a 10.

Altro fattore da considerare in un sistema produttivo è l'imprevisto. I sistemi elementari EWS che producono un componente individuale del prodotto finale sono separatamente semplici da gestire e da controllare, l'imprevisto deriva dalla loro integrazione che dà luogo all'insieme del sistema manifatturiero. Tale sistema al contrario è complesso e difficile da controllare e gestire. La ricerca si sta pertanto orientando verso l'individuazione di leggi e regole che governino i fenomeni imprevedibili, consentendo di individuare un nuovo paradigma per la produzione.

5.2 Tipologie di complessità

Si riportano di seguito le definizioni di complessità più spesso reperibili in letteratura, descrivendo il significato di ciascuna in poche righe che riassumono i concetti espressi in diversi lavori. Queste definizioni si sovrappongono e si integrano tra loro, risultando talvolta ridondanti. Per ogni tipo viene segnalata la specifica categoria professionale per la quale una misura di tale complessità può essere di supporto, pur nella consapevolezza che in realtà nella odierna “fabbrica integrata” tutte le competenze sono coinvolte contemporaneamente nell’intero processo di sviluppo del prodotto.

Complessità di prodotto:

il prodotto é l’obiettivo principale di una azienda manifatturiera attorno al quale ruota tutta l’organizzazione dell’impresa. La sua complessità può essere definita a partire da diversi parametri quali la forma geometrica, la tolleranza dimensionale e di lavorazione (features) che sono intrinseci al prodotto, anche se possono influire altri fattori quali le caratteristiche delle lavorazioni per fabbricarlo e l’infrastruttura industriale al contorno. L’indice di complessità di prodotto può costituire un valido supporto a progettisti e industrializzatori.

Complessità di mix produttivo:

spesso uno stesso sistema di produzione deve produrre un mix di prodotti diversi per cui flussi di materiale, tecnologie produttive e macchinari devono intersecarsi e integrarsi in un layout di produzione determinando una complessità di gestione del mix. Al fine di ottimizzare la produzione, i prodotti che presentano caratteristiche analoghe possono essere raggruppati in base al principio della Group Technology. L’indice di complessità di mix può essere pertanto considerato come una valutazione delle performance aziendali e utilmente correlato ai tempi e costi di produzione, quindi utile in particolare ai manager di produzione.

Complessità di processo:

per ogni singolo processo produttivo è significativo considerare la composizione, il numero di operazioni, la difficoltà relativa ad ogni singola operazione, le varianti, i tempi di set up e i tempi di lavorazione delle macchine. Tutte queste variabili compaiono nell’indice di complessità di processo, strettamente dipendente pertanto dalle caratteristiche dell’impianto ma che può essere correlato, ancora più che la complessità di prodotto, anche a fattori esterni all’impresa, quali la

tempistica delle forniture e l'infrastruttura industriale. L'indice di complessità di processo è particolarmente utile in un contesto di industrializzazione e frammentazione della produzione. Le figure professionali che possono avvalersi di tale indice sono progettisti, industrializzatori e responsabili di produzione.

Complessità di pianificazione o percorso (routeing)

un aspetto importante all'interno di un'impresa manifatturiera è la pianificazione della produzione. Il numero di piani possibili rispetto a quelli economicamente vantaggiosi risulta spesso molto elevato, pertanto la misura di una complessità di pianificazione diventa un strumento di supporto alla scelta. Alcuni autori considerano la complessità di routeing come una componente fondamentale nella complessità di prodotto o di processo, certamente utile per la pianificazione della produzione e quindi a industrializzatori e responsabili di produzione.

Complessità operativa o di fabbricazione:

considerando l'insieme dei processi produttivi tra loro connessi e integrati, l'indice di complessità delle operazioni è riferito in genere al contesto interno aziendale ed è utile come parametro di valutazione dell'efficienza del sistema e dello "sforzo" produttivo, cioè si riferisce alla fabbricazione del prodotto costituendo un'utile indicazione per progettisti e industrializzatori.

Complessità di progettazione:

Il supporto informativo del prodotto è il progetto che ne definisce specifiche e caratteristiche. Durante la progettazione del prodotto a fianco della definizione dei requisiti funzionali viene stabilito come realizzarli, tenendo conto di tecnologie e impianti produttivi disponibili, in quello che viene definito un approccio di ingegneria concorrente.

La complessità di progetto deriva pertanto dalla capacità del prodotto di soddisfare tali requisiti e dagli imprevisti che possono insorgere durante l'uso del prodotto, determinandone una perdita di funzionalità. Un indicatore di questa complessità può essere di supporto all'attività del designer.

Complessità di progetto:

si riferisce alle attività di progettazione del prodotto e al grado di complessità che presenta nel suo insieme l'organizzazione del progetto, anche in relazione al numero di persone coinvolte e alla modalità di lavoro, alla sua pianificazione temporale e al relativo controllo degli obiettivi raggiunti. Una misura che quantifichi questo aspetto può essere utile ai Project Leader.

Complessità di sistema produttivo:

se si stabilisce una gerarchia, si tratta del livello più alto di complessità, all'interno del quale possono essere comprese le complessità fin qui definite. Questa complessità raggruppa fattori interni che definiscono il sistema impresa e fattori esterni che influiscono sul sistema legati alle forniture e al contesto industriale in cui si trova inserita l'azienda. Una misura di questa complessità certamente può costituire un supporto nell'attività di responsabile di stabilimento produttivo.

Complessità della catena di fornitura:

Nell'influenza reciproca fra sistema azienda e contesto esterno, con particolare riferimento al sistema di fornitura, la complessità può essere assorbita o esportata. Esportare complessità nei confronti di un fornitore può essere controproducente rispetto al rapporto di collaborazione e creare un effetto di ritorno dovuto all'incapacità del partner di assorbire la complessità esportata dall'azienda, viceversa alleggerisce l'impresa nei suoi processi produttivi diminuendo la complessità da gestire internamente. Di questo aspetto devono essere consapevoli coloro che decidono la frammentazione e integrazione della produzione, scegliendo grado e tipologia di fornitori, quindi gli operatori dell'ufficio acquisti e i responsabili di produzione, ma anche gli stessi progettisti che devono progettare il prodotto anche in considerazione dei tipi di fornitura.

Altra distinzione da sottolineare è quella tra complessità statica e complessità dinamica:

Complessità statica: è una funzione della struttura del sistema, degli elementi di connessione, della varietà dei componenti e delle forze di interazione. Viene definita a partire dal database aziendale, cioè dai dati relativi alle distinte base dei materiali, cicli di lavoro, centri di lavoro ecc.

E' associata pertanto alla *varietà intrinseca del sistema*.

Complessità dinamica: è una funzione delle procedure operative del sistema e ha a che fare con la imprevedibilità del comportamento del sistema in un determinato periodo. Viene calcolata a partire da osservazioni e rilevamenti sul sistema condotti a intervalli di tempo regolari in un tempo definito: per ex. code e stati sulla macchina, lavorazione, attività o inattività ecc.

E' associata pertanto alla *incertezza del sistema* in funzionamento.

5.3 Definizioni qualitative di complessità

Sono molti gli autori che si limitano a fornire una definizione qualitativa della complessità senza proporre un concreto metodo di calcolo. In questo paragrafo si compie una panoramica su tali testi, che costituiscono comunque significativi suggerimenti per gli scopi del presente lavoro.

Nel 1994 *H.P. Wiendhal, P. Scholtissek* [67] forniscono una panoramica del problema della complessità e del suo controllo nell'ambito dei processi manifatturieri. La loro tesi è che la complessità è aumentata con l'incremento del numero di componenti di prodotto e di procedure interne alle aziende e in base a questo individuano in alcuni fattori gli elementi chiave che influiscono sulla complessità:

- tempo di consegna
- qualità del prodotto
- integrazione delle funzioni all'interno dell'azienda (ingegneria simultanea)
- coordinazione ordini-clienti

Viene inoltre rilevato che le principali strategie da parte delle aziende per la riduzione della complessità sono:

- decentralizzazione delle funzioni (segmentazione)
- sfruttamento della creatività, esperienza e competenza degli impiegati
- concentrazione delle abilità fondamentali dell'azienda.

Il problema della valutazione e controllo della complessità dal punto di vista scientifico può essere affrontato secondo gli autori seguendo tre approcci:

- creazione di un modello che consente di definire una metodologia di progettazione e fabbricazione del prodotto
- monitoraggio del sistema produttivo attraverso strumenti di rilevamento ed elaborazione dati
- elaborazione di una idea e simulazione della situazione reale

Nel 1997 *Michael Lissack* [68] fornisce un originale contributo alla ricerca sulla complessità sottolineando come la condivisione di un linguaggio comune della complessità abbia una grande importanza in un contesto manageriale. Il problema del management di un'impresa, in particolare produttiva, è la gestione di un elevato quantitativo di dati e informazioni, e la capacità di estrarre da questo valore aggiunto. Le metafore della teoria della complessità consentono ai manager di trovare nuovi modi di ragionare e di comunicare. I sistemi produttivi e in generale le

organizzazioni aziendali vengono sempre più spesso assimilate alla teoria del caos in quanto caratterizzati da una mancanza di controllo. In realtà secondo l'autore la teoria della complessità non è ancora matura per spiegare concretamente nulla ma il suo potere descrittivo può essere utilizzato per aiutare nella modellazione di ciò che vediamo intorno a noi quindi può costituire un potente strumento per organizzare una risposta corporativa all'ambiente esterno competitivo. Il manager consapevole delle metafore della complessità può cambiare il suo sistema di gestione e i problemi che sceglie di gestire ed agire pertanto più efficacemente.

Nel 1998 **Bart R.Meijer** [69] riprendendo precedenti autori afferma che i sistemi complessi sono il risultato di tre aspetti:

1. numero di entità e di relazioni coinvolte

questi parametri possono essere definiti e controllati attraverso algoritmi e sistemi informatici che eseguono una scomposizione del sistema.

2. aspetto temporale delle relazioni tra entità

che può essere dinamico/deterministico, nel qual caso è possibile individuare delle leggi anche se non sempre realistiche, o stocastico con un certo grado di incertezza che può essere però ridotto facendo delle medie al fine di ottenere una descrizione statica del sistema attraverso la quale sia più facile da controllare. A tale scopo vengono utilizzati modelli basati sul concetto di energia e entropia.

3. aspetto temporale della struttura delle entità e relazioni (fisso o modificabile, stabile o instabile). I sistemi che hanno una struttura che cambia continuamente possono essere definiti organici. Questi sistemi sono descritti e controllati al meglio usando concetti della teoria del caos e algoritmi di evoluzione genetica (che verranno descritti nel capitolo 6), basati sui concetti biologici di selezione naturale e di genetica delle popolazioni.

Al fine di ridurre la complessità possono essere utilizzate diverse strategie:

- decomposizione gerarchica: l'organizzazione è disegnata come una struttura ad albero gerarchico in cui le funzioni vengono raggruppate in dipartimenti, in base alla somiglianza dei compiti.
- isolamento/ripartizione: l'azienda viene scomposta con orientamento al prodotto, si stabilisce un punto del processo produttivo oltre il quale la produzione è organizzata solo in funzione dell'ordine del cliente.

- applicazione della teoria del caos alla scienza del management: concetto di “core competence”. Una ben definita e sviluppata “core competence” può essere la sorgente di varie attività coerenti di business.

Il suggerimento conclusivo dell'autore è di non tentare di gestire e controllare la complessità, quanto di organizzarsi intorno ad essa identificandone le origini e preparando lo staff aziendale ad affrontare gli aspetti complessi della produzione.

Nel 1999 *H.P.Wiendhal e H.Scheffczyk* [70] riprendono l'idea di Lissack e altri autori precedenti definendo la complessità di un sistema produttivo con un approccio dinamico che si rifà alla teoria del caos.

La complessità nell'industria cresce e caratterizza diversi aspetti dell'attività aziendale quali: prodotti, macchine e strutture, mercati. Il continuo arrivo di nuovi ordini imprevisti e il succedersi di tutti i tipi di disturbi come la rottura di una macchina, il ritardo nelle operazioni ecc. rendono il sistema dinamico e caotico. Il sistema reagisce in modo diverso da quanto si può prevedere, non è lineare e il fenomeno non può essere spiegato, predetto o preventivato.

Al fine di descrivere il comportamento caotico di un sistema di produzione gli autori scelgono il semplice caso di una lavorazione di verniciatura di una lamiera metallica sulla quale viene spruzzata la vernice in due fasi successive. Al termine viene misurato lo spessore e deciso se accettare o scartare il pezzo. Si vuole correlare la misura dello spessore finale ad un parametro macchina, quale la pressione dello spruzzatore P.

Con un approccio di *analisi statistica* i dati sperimentali mostrano che la correlazione spessore th – numero della verniciatura n è del tutto casuale.

Ma affrontando il problema con metodi di *dinamica non lineare*, se si trasformano i dati in vettori di ritardo bidimensionali in cui riportare lo spessore della verniciatura n combinato con lo spessore della verniciatura $n+1$, si rileva che in corrispondenza di un determinato valore di P (=12) lo stato del sistema di verniciatura ricostruito in una dimensione spaziale tramite i vettori sopra definiti, assume un andamento ben definito che può essere rappresentato da una funzione

$$th_{new} = \frac{P}{3} th_{previous} (1 - th_{previous})$$

questa equazione descrive la coerenza tra il nuovo spessore e il precedente ed è chiamata in generale equazione logistica corrispondente ad un comportamento caotico deterministico.

La struttura che rappresenta nella fase spaziale questa equazione non è visibile in un istogramma statistico. Limitandosi pertanto ad una valutazione statistica si assumono valori di $P < 10$ per raggiungere un rendimento massimo, mentre i metodi di dinamica non lineare fanno preferire il valore $P = 12$. Quindi i risultati raggiunti con l'approccio classico e con quello dinamico sono significativamente diversi.

E' pertanto possibile sviluppare procedure di controllo che sono in grado di dominare e stabilizzare sistemi di produzione complessi sulla base di questo tipo di strutture ricavabili seguendo un approccio dinamico.

Nel 2000 **K.K.B.Hon** [71] fa il punto della situazione sulla complessità e riprendendo la definizione di MacDuffie del 1996, relativa all'industria automotive, individua nella complessità manifatturiera quattro dimensioni:

1. complessità di mix-modello
2. complessità di parti
3. complessità di opzioni-contenuto
4. complessità di opzioni-variabilità

Seguendo un approccio più olistico definisce i seguenti ambiti che determinano la complessità manifatturiera:

1. complessità di processo
2. complessità di prodotto
3. complessità di pianificazione del ciclo di lavorazione (routing)
4. complessità del mix di prodotti
5. complessità della catena di fornitura
6. complessità dei sistemi

Per quanto riguarda la misura della complessità di un sistema manifatturiero, l'autore tenta una prima classificazione delle diverse metodologie, constatando che nelle ricerche precedentemente svolte possono essere individuati quattro tipi di approccio:

- complessità dipendente dal prodotto basata sul numero di parti o componenti
- complessità dipendente dal processo basata sulla profondità e ampiezza del sistema manifatturiero
- modello basato sulla entropia in base alla teoria dell'informazione di Shannon (Frizelle 1997 e altri)
- modello basato sulla teoria della presa di decisioni (Meyer e Curley 1995)

Il limite che viene individuato in tutte le metodologie elencate è la focalizzazione di un solo aspetto di complessità e l'incapacità di seguire dinamicamente i cambiamenti di complessità.

Nel 2001 *Victor Tang e Vesa Salminen* [72] distinguono tra *complexity* e *complicatedness*. Definiscono l'ambiente industriale come sempre più dinamico, globale e competitivo e che ha portato ad una crescente complessità nei prodotti, servizi, processi produttivi e aspetti organizzativi. Molti sforzi della ingegneria sono pertanto rivolti a ridurre la complessità dei sistemi complessi. In realtà il vero punto è ridurre la complicazione. La complessità può essere una proprietà desiderabile del sistema, un'architettura complessa può in realtà ridurre la complicazione del sistema. La complessità è pertanto una proprietà intrinseca del sistema, la complicazione è una funzione derivata della complessità, si tratta quindi di due concetti distinti. Prendendo ad esempio il cambio automatico di un'auto rispetto al manuale, è caratterizzato da più parti e da più intricati legami. Dal punto di vista meccanico è più complicato, da un punto di vista dell'utilizzatore lo è meno.

La *complessità* può essere definita in termini del numero di elementi, numero di interazioni tra loro e dall'intensità di queste interazioni che determinano la complessità del sistema.

Dato un sistema $N = \{n_i\}_{i=1,2,\dots,p}$ a seconda del grado di interazione tra gli elementi la complessità è $C_N = O(p^k)$ con $k > 1$.

La complessità può essere definita come:

$$C = X^n \sum_b B^b$$

in cui:

X è un integrale che indica il numero di elementi del sistema $\{x_e\}_{e=1,\dots,p}$

e

$$B_1 = \sum_{ij} \lambda_{ij} \beta_{ij}$$

in cui:

λ_{ij} è il numero di legami tra x_i e x_j

β_{ij} è l'intensità dei legami tra x_i e x_j

$$B_2 = \sum_k \lambda_k^{ij} \beta_k^{ij}$$

in cui:

λ_k^{ij} è il numero di legami tra x_k e (x_i, x_j)

β_k^{ij} è l'intensità dei legami tra x_k e (x_i, x_j)

e in generale

$$B_n = \sum_n \lambda_p^{ijk\dots n-1} \beta_n^{ijkl\dots n-1}$$

in cui:

$\lambda_k^{ijkl\dots n-1}$ è il numero di legami tra x_k e $(x_i, x_j), (x_i, x_j, x_k), \dots, (x_i, x_j, x_k, x_l, \dots, x_{n-1})$

$\beta_k^{ijkl\dots n-1}$ è l'intensità dei legami tra x_k e $(x_i, x_j), (x_i, x_j, x_k), \dots, (x_i, x_j, x_k, x_l, \dots, x_{n-1})$

La *complicazione* è il grado con il quale una unità di decisione del sistema è capace di gestire il livello di complessità presentato dal sistema stesso.

La complicazione è una funzione della complessità e può essere definita come:

$$K(C) = \frac{K_{max}}{(1 + e^{-\alpha C})}$$

in cui:

$e = 3,27182818284\dots$

α è una costante specifica alla unità di decisione

C è la complessità del sistema

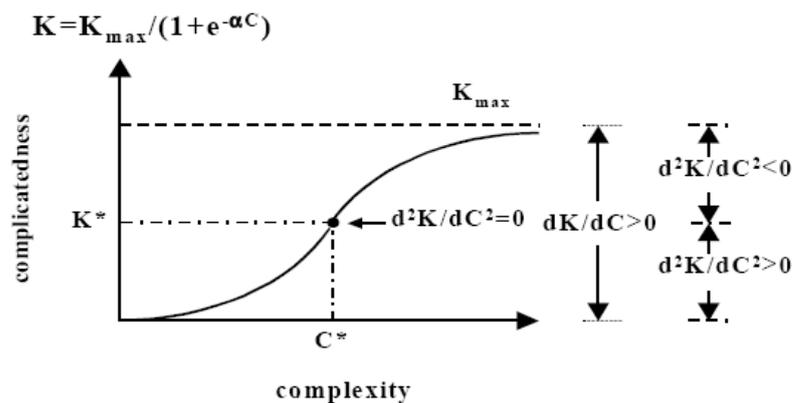


Fig.5.3 Complexity and Complicatedness [72]

Al fine di ridurre la complicazione occorre definire una complessità architettata, cioè una strategia efficace di gestione della complessità pianificandola affinché non sia casuale ma voluta e ottimizzata. Tecniche per ottenere tale complessità sono la partizione del sistema in moduli, e la loro reintegrazione al fine di riottenere una integrità del sistema. Nel caso di progettazione di un prodotto meccanico possibili strumenti sono le matrici di progettazione della struttura.

Concludendo la distinzione tra complessità e complicazione aumenta la chiarezza con cui i sistemi possono essere descritti e analizzati.

Nel *2002 C.E. Siemieniuch e M.A. Sinclair* [73] sottolineano la necessità di introdurre nel concetto di complessità gli aspetti di tipo organizzativo e relativi alle risorse umane di un'azienda produttiva, affermando che la complessità richiede più organizzazione che eccellenza tecnica e fornendo una definizione di complessità in termini di interazioni tra le entità organizzative caratterizzate da comportamenti non prevedibili.

I fattori che danno origine alla complessità, risultando pertanto causa di comportamenti complessi, e pertanto significativi ai fini della determinazione della complessità in un'ottica di analisi degli aspetti legati alle risorse umane, sono i seguenti:

- molti operatori di diversi tipi
- qualche grado di libertà nell'autonomia di comportamento degli operatori
- molteplici ruoli fissi per gli operatori (la stessa persona svolge più ruoli)
- interazioni tra operatori in un ambito
- molte connessioni tra operatori
- comunicazioni in parallelo
- effetti di un ambiente in evoluzione
- effetti di co-evoluzione degli operatori (due operatori in contatto tra loro cambiano i loro comportamenti come risultato di una pressione esterna diventando più collaborativi o più competitivi)
- interazioni tra obiettivi diversi nello stesso operatore
- interazioni tra operatori con diversi obiettivi
- differenze di linguaggio/cultura.

Al fine di un calcolo di complessità occorre pertanto quantificare tutti gli aspetti sopra individuati.

Nel *2003 C.A.Rodriguez-Toro, S.J. Tate, G.E.M. Jared e K.G.Swift* [74] trattano la complessità di progetto in funzione dell'assemblaggio, che è uno degli aspetti principali del

calcolo di complessità. In particolare considerano la complessità una informazione importante a supporto dell'assembly-oriented design, al fine di guidare i designer nella creazione di un prodotto con il più efficace equilibrio tra fabbricazione e difficoltà di assemblaggio. Entrambi gli aspetti saranno approfonditi nel capitolo 8, rispettivamente nei paragrafi 8.1 (design) e 8.2 (assemblaggio).

Gli autori forniscono, anche riprendendole da altri, definizioni di *complessità nell'ambito del progetto di prodotto* che derivano dalla sua *geometria* definita in termini delle coordinate dei vertici e del tipo di poligoni a cui si può ricondurre, dalla sua *topologia* cioè numero di tipo di facce, loro orientamento, interazioni relative e loro distribuzione attraverso l'oggetto e dall'*assemblaggio* che considera il numero di inserzioni, re-orientamenti, operazioni di montaggio e profondità nella gerarchia della struttura del prodotto. Queste misure hanno come obiettivo quello di consentire una riduzione nella complessità del prodotto, mantenendone le funzionalità ma generando un progetto semplice.

In particolare si individuano:

Complessità di produzione C_m : in cui tipo, numero e difficoltà delle operazioni produttive sono direttamente correlate alla geometria del componente.

Complessità di processo C_p : quantifica la difficoltà associata con le operazioni di allineamento, inserimento e movimentazione sulle parti individuali o sub-assemblate.

Complessità di assemblaggio che implica due tipi di complessità:

- *Complessità strutturale C_{st}* : configurazione e struttura del prodotto, per ridurla occorre eliminare dove possibile le parti non funzionali.

- *Complessità in sequenza C_s* : numero e sequenza di operazioni richieste per assemblare un prodotto, direttamente influenzata dalle decisioni prese in fase di progettazione.

Pertanto si può concludere che:

Un elevato numero di componenti semplici porta a una complessità di assemblaggio elevata.

Un basso numero di componenti complessi porta anche a una complessità di assemblaggio elevata.

Gli autori individuano una sequenza di operazioni al fine di definire e misurare la complessità:

1. stabilire precise definizioni per ciascun tipo di complessità
2. definire metodologia e unità di misura (entropia ecc.)
3. definire il peso dei diversi fattori che intervengono nella complessità
4. individuare le dipendenze nascoste tra i componenti.

Considerazioni sulla complessità calcolata a partire da caratteristiche geometriche del prodotto:

L'articolo di C.A.Rodriguez-Toro, S.J. Tate, G.E.M. Jared e K.G.Swift fornisce alcuni significativi spunti in merito alla possibilità di calcolare la complessità di prodotto a partire dalle sue caratteristiche geometriche, che verranno utilizzati e approfonditi nelle nuove metodologie proposte nel presente lavoro.

In parecchie applicazioni come la computer graphics le griglie e i poligoni sono definiti come geometrie (coordinate e valori) e connettività degli oggetti. Sono stati usati diversi algoritmi per la triangolazione delle griglie, in base ai quali viene definita la complessità di forma come il numero degli angoli di un poligono, realizzando una compressione della topologia del modello e, inoltre, favorendo la riduzione di ridondanza relativa ai vertici e superfici condivise da più entità. Il modello di complessità in questo contesto è utilizzato per stabilire il miglior algoritmo di compressione per il particolare oggetto, allo scopo di assicurare la minima perdita di informazioni.

La topologia del prodotto richiama il problema della codifica delle parti basata sulla filosofia di produzione della Group Technology. Alcuni sistemi di codifica posseggono strumenti di ricerca basati su indici di similarità fra la serie di forme richieste e quelle dei pezzi registrati, basati sulla comparazione delle caratteristiche in comune e di quelle assenti fra le parti codificate. presenti nel database del sistema.

Sono stati proposti diversi algoritmi per valutare la similarità geometrica di modelli tridimensionali e considerando per quantificare la complessità di forma caratteristiche quali: numero di facce in un modello, numero di lati di un poligono, presenza di curve, simmetria, numero di giri, grado di compattezza, variabilità angolare e rugosità.

In questo ambito si può pensare di formulare una complessità misurata a partire dal *riconoscimento di features* della stessa classe o famiglia. Un algoritmo valido a questo proposito potrebbe quantificare la complessità di un oggetto nei termini di numero e tipi di faccia, dei loro orientamenti relativi e interazioni (complessità locale) e della loro distribuzione nell'oggetto (complessità globale). Questa è una modalità che potenzialmente interessante ai fini dello sviluppo di un nuovo metodo.

5.4 Stato dell'arte della ricerca scientifica sulla complessità e classificazione dei metodi di calcolo:

Al fine di elaborare una nuova metodologia è stato analizzato lo stato dell'arte della ricerca sulla complessità in ambito industriale [12] attraverso la raccolta di articoli e documenti relativi all'argomento, pubblicati da diversi autori negli ultimi trenta anni. A tale scopo sono state svolte ricerche bibliografiche in biblioteche e tramite Internet che hanno portato ad individuare circa un'ottantina di articoli riguardanti la complessità pubblicati dal 1980 ad oggi, i cui titoli, autori ed editori sono riportati in bibliografia.

I lavori sono stati raccolti distinguendo definizioni e misure di complessità relative alle tre principali fasi di sviluppo di un prodotto industriale:

- Progettazione (design)
- Fabbricazione (manufacturing)
- Assemblaggio (assembly).

In realtà queste tre fasi sono integrate attraverso le metodologie dell'ingegneria concorrente, al fine di evitare modifiche tardive e aggravio di tempi e costi. Ognuna è però caratterizzata da specifici aspetti della complessità che porta molti autori a formulare definizioni distinte.

Dagli anni '80 ad oggi sono state introdotte diverse metodologie per il calcolo della complessità tecnologica. Nel decennio '80-'90 era largamente diffusa la tecnica dei sistemi esperti, programmi matematici che, a partire dagli input di operatori esperti del settore, consentivano di valutare l'interazione tra le numerose variabili in gioco nel sistema, fino ad ottenere una previsione del suo andamento e in particolare il calcolo di un indice di complessità del sistema stesso. Dagli anni '90 ad oggi, in genere si sono preferite matematiche semplici, pur restando elevato il numero di fattori dei quali tenere conto se si vuole fornire un quadro completo della complessità. Talvolta i parametri e i relativi pesi vengono individuati a partire da indagini svolte su progettisti e manager di produzione, attraverso interviste e questionari, il che implica una valutazione della complessità soggettiva, ma molti sono anche gli approcci più rigorosi che individuano metodologie efficaci a partire da dati rilevabili oggettivamente sul sistema, indipendenti da opinioni personali.

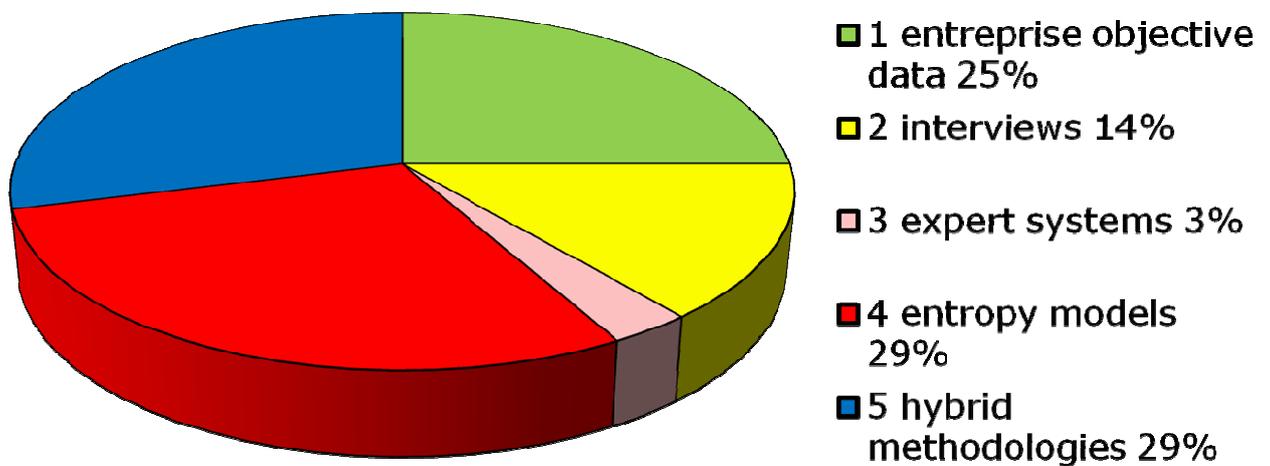


Fig.5.4 Distribuzione metodi di misura della complessità tecnologica [12]

Le categorie individuate, riportate in percentuale sul totale di pubblicazioni esaminate in fig. 5.4 sono le seguenti:

1. *Complessità misurata a partire dalla raccolta di dati oggettivi all'interno dell'impresa*
2. *Complessità definita attraverso interviste agli operatori aziendali*
3. *Complessità calcolata attraverso l'uso di un sistema esperto*
4. *Complessità calcolata attraverso il modello entropico*
5. *Complessità calcolata con metodologie ibride*

Si possono individuare due approcci:

A calcolo della complessità *soggettivo* attraverso l'attribuzione di punteggi utilizzando questionari

B calcolo della complessità *oggettivo* a partire da dati del sistema che possono essere elaborati secondo diversi metodi matematici.

Il *problema della soggettività/oggettività nella misura della complessità* è uno dei punti focali del presente lavoro. La posizione di chi scrive è di cercare di rendere la misura il più oggettiva possibile, pur nel riconoscimento della validità di metodi proposti anche di tipo soggettivo.

Gli articoli dai quali si è ricavata la precedente classificazione sono descritti nel capitolo 7, raggruppati per categoria di appartenenza della metodologia di calcolo proposta, analizzando i punti di forza e di debolezza dei metodi più significativi, allo scopo in particolare di ricavare preziose indicazioni per la elaborazione del nuovo metodo.

6. L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE COME POSSIBILI STRUMENTI DI CALCOLO DELLA COMPLESSITA'

6.1 L'Intelligenza Artificiale

Il termine intelligenza artificiale viene coniato nel 1955 da uno dei più importanti scienziati informatici di tutti i tempi John McCarthy inventore di diversi linguaggi di programmazione che creò nel 1962 presso l'Università di Stanford il primo laboratorio di intelligenza artificiale al mondo. Le prime applicazioni di Intelligenza Artificiale sono state negli anni '60 giochi e la dimostrazione dei teoremi matematici, quindi in particolare la risoluzione di problemi che implicano più procedimenti risolutivi tra i quali scegliere il più efficace.

L'IA si pone l'obiettivo di riprodurre la modalità di pensiero e ragionamento della mente umana in una macchina. Per farlo vengono utilizzati modelli (corredati da un'appropriata descrizione dei problemi da risolvere) e algoritmi (rappresentanti la procedura effettiva per risolvere il problema).

Un computer in grado di pensare deve comprendere varie *attività e capacità*:

- apprendimento automatico (*machine learning*)
- rappresentazione della conoscenza e ragionamento simile a quello della mente umana
- pianificazione (*planning*)
- cooperazione tra agenti intelligenti, sia software che hardware
- elaborazione del linguaggio naturale (*Natural Language Processing*)
- simulazione della visione e dell'interpretazione di immagini, così come avviene nel caso dell'OCR (Optical Character Recognition).

I *principali algoritmi utilizzati nell'Intelligenza Artificiale* sono:

- algoritmi per la **rappresentazione della conoscenza**. Vengono realizzati attraverso linguaggi che permettono di formalizzare la *conoscenza* e, successivamente, di applicare l'*inferenza*. Sono in particolare utilizzati in ambito industriale per sopperire ad alcune funzioni eseguite da operatori esperti della relativa materia.
- **apprendimento automatico**. (*Machine Learning*). questi sistemi si basano su osservazioni o esempi come dati per la sintesi di nuova conoscenza. Permettono pertanto di dedurre conseguenze ed elaborare soluzioni in merito a problemi così come farebbe

l'uomo ragionando a partire da determinati input. L'apprendimento automatico si suddivide in tre categorie:

- 1- **apprendimento non supervisionato.** (*Clustering, Regole di associazione*) si realizza attraverso tecniche che mirano ad estrarre in modo automatico la conoscenza da basi di dati. Esempi di questo tipo di apprendimento sono i motori di ricerca che permettono di individuare link di pagine inerenti all'informazione ricercata. Questi algoritmi lavorano pertanto efficacemente in presenza di dati corrispondenti ad un ordinamento o ad un raggruppamento identificabile.
 - 2- **apprendimento supervisionato.** (*Albero di decisione, Regole di decisione, Sistemi esperti*). Tecniche di apprendimento automatico che mirano a istruire un sistema informatico con l'intento di consentirgli di risolvere i compiti in automatico. Molti di questi algoritmi lavorano in un mondo lineare, presupponendo che a ingressi simili corrispondano uscite simili. È possibile dire che il corretto funzionamento di questi algoritmi dipende in modo significativo dai dati in ingresso. Pochi dati in ingresso possono portare ad una base di conoscenza insufficiente. Al contrario molti dati in ingresso possono fornire i risultati attesi.
 - 3- **apprendimento per rinforzo.** (*Reti neurali, Algoritmi genetici o evolutivi, Sistemi a classificatori*). Vengono realizzati algoritmi che si adattano e che apprendono dall'ambiente. Questa tecnica di programmazione si basa sul presupposto di poter ricevere stimoli dall'esterno a seconda delle scelte dell'algoritmo. Per questo una scelta corretta porterà ad un premio, una scelta scorretta porterà ad una penalizzazione del sistema. Ovviamente l'obiettivo è quello di raggiungere il più elevato premio possibile cioè il miglior risultato possibile.
- **Programmazione Logica Induttiva (ILP)** È un sinonimo dell'apprendimento relazionale, ossia apprendimento nel contesto di rappresentazioni corrispondenti alla logica classica.
 - **Visual retrieval.** Sistema di recupero delle immagini in base al loro contenuto percettivo. Il recupero può essere basato sul colore, texture, forma, relazioni spaziali, traiettoria.
 - **Visione artificiale.** Insieme di processi che mirano a creare un modello approssimato nel mondo reale (3D) partendo da immagini bidimensionali. Lo scopo è quello di riprodurre fedelmente la vista umana.
 - **Tecnica del soddisfacimento di vincoli.** Si utilizza principalmente per la risoluzione di problemi combinatori, di allocazione di risorse, pianificazione e ragionamento temporale.

6.4 Metodi computazionali intelligenti nella produzione

Dal finire degli anni '90 sono stati sviluppati diversi strumenti intelligenti di calcolo utilizzabili in ambito produttivo. Vengono elencati di seguito quelli più diffusi insieme alle loro principali caratteristiche [75].

Expert Systems (ES)

sono programmi computerizzati comprensivi di una base di conoscenza su un dominio di riferimento che viene utilizzata per risolvere problemi inerenti al dominio considerato, i primi sistemi esperti sono stati realizzati all'inizio degli anni '70. Il sistema esperto esegue le stesse operazioni di una persona esperta in materia, deve essere in grado di dare i medesimi giudizi e di fornire le stesse spiegazioni. Un ES sostituisce pertanto l'esperto della materia, in particolare l'operatore aziendale che deve risolvere problemi all'interno di un'impresa

Un sistema esperto si articola in tre parti tra loro integrate:

- Base di conoscenza
- Motore inferenziale
- Interfaccia utente

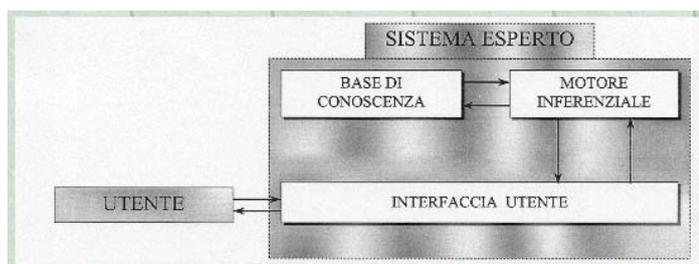


Fig.6.1 Struttura di un sistema esperto

La differenza che esiste tra un sistema tradizionale e un ES è che i sistemi esperti utilizzano tecniche euristiche e sono guidati da dati, ma non da una definita procedura. L'approccio euristico prevede che, se anche una soluzione è ritenuta soddisfacente, non è per forza quella che noi stiamo cercando. Tutte le soluzioni sono considerate soddisfacenti, si prende come valida quella che più si avvicina all'obiettivo finale. La *tecnica euristica*, come verificato nella presente ricerca,

è alla base di alcune tra le più significative metodologie di calcolo della complessità ad oggi proposte dalla comunità scientifica.

Esempi di applicazione sono la Nissan e la Toyota che utilizzano un sistema esperto per la modellazione del flusso dei materiali, l'applicazione delle norme e il coordinamento della fabbricazione lungo tutta la linea produttiva.

Knowledge-Based Systems (KBS)

I Knowledge-Based Systems. costituiscono un sottogruppo dei sistemi esperti che in particolare viene utilizzato quando ci si basa su una conoscenza articolata di uno specifico argomento. Vengono prevalentemente utilizzati in problemi complessi di tipo decisionale, a livello industriale in particolare durante la fase di progettazione del prodotto.

La caratteristica che qualifica questa tecnica come Intelligenza Artificiale è la incompletabilità del sistema. Questo perché la conoscenza, che deriva da diverse fonti di informazione, come mostrato in fig. 6.2 non è mai completa e può essere continuamente aggiornata. Si tratta quindi di uno strumento che guida l'utente, attraverso l'utilizzo di proposizioni logiche quali alberi di decisione, tabelle di verità, etc., verso una scelta corretta.

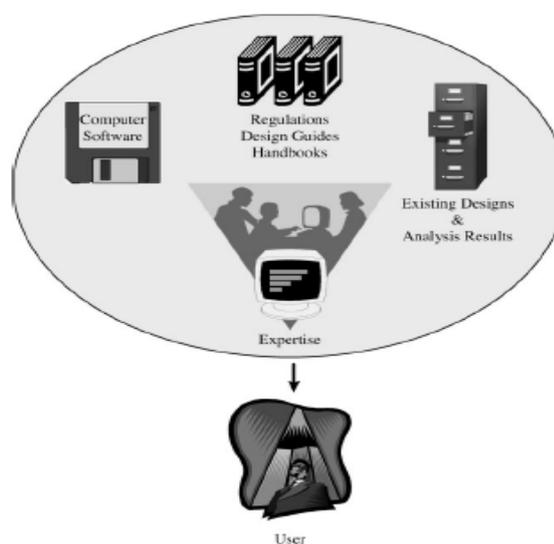


Fig. 6.2 Rappresentazione grafica di un KBS e delle fonti di informazione della base di conoscenza [76].

Insieme ai Sistemi Esperti costituiscono la tecnica di IA più matura, essendo già disponibili commercialmente parecchi sistemi di sviluppo per facilitare la loro fabbricazione.

Multi-Agent (MA)

La tecnica più utilizzata nell'ambito del controllo e della supervisione è l'*agent-based software*, in quanto particolarmente adatta al controllo distribuito. L'affidabilità e la flessibilità di un sistema manifatturiero dipendono dall'affidabilità e dalla flessibilità del sistema di controllo incorporato, ovvero, nella maggior parte dei casi, di un software agent-based.

Un tipico processo di produzione è molto simile ad una soluzione Multi-agent, dove ogni dipartimento (o segmento) del sistema produttivo è rappresentato da un agente che, collaborando e cooperando assieme agli altri agenti, realizza i compiti di produzione. Un agente può fare osservazioni in merito al suo ambiente, ha una propria conoscenza, dispone di preferenze riguardo agli stati dell'ambiente e inizia ed esegue azioni che cambiano l'ambiente che lo circonda. [77]. Questo concetto viene rappresentato in fig. 6.3.

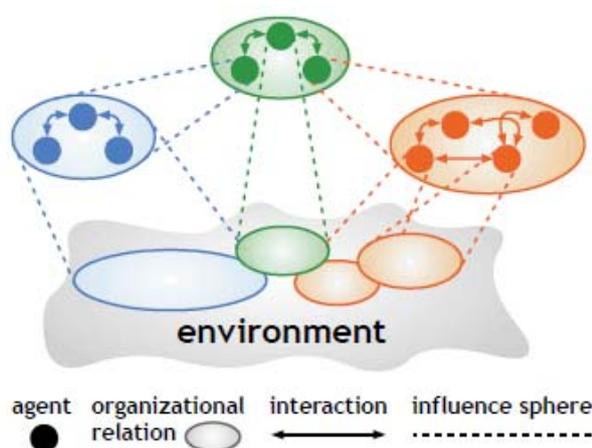


Fig.6.3 Schema generico di un sistema multi-agente [76].

Si può quindi dedurre che l'idea alla base di un sistema multi-agent è la decentralizzazione del controllo dove l'organizzazione viene realizzata autonomamente (self-organization).

Applicazioni industriali:

I sistemi multi-agent possono essere applicati a tutti le diverse fasi di sviluppo del prodotto: design, process planning, pianificazione produzione e allocazione risorse, programmazione, controllo monitoraggio, diagnosi, assemblaggio.

Neural Networks (NN)

Le reti neurali sono rappresentate da modelli matematici che definiscono le interconnessioni tra elementi (neuroni o nodi artificiali) rappresentanti il cervello umano. Simulano pertanto il comportamento del cervello umano combinando pattern di riconoscimento, ragionamento deduttivo e computazione numerica.

La prima rete neurale denominata “Perceptron” fu inventata presso i Cornell Aeronautical Laboratory di New York nel 1957. Si trattava di un classificatore lineare in grado di raggruppare oggetti in base a valori simili delle loro caratteristiche, il che ricorda la Group Technology, cioè il raggruppamento dei prodotti in famiglie in base a caratteristiche simili di natura geometrica e tecnologica.

Lo scopo delle reti neurali è riprodurre i molteplici metodi di apprendimento del cervello umano, facendo in modo che la rete interagisca con l’ambiente esterno senza l’aiuto dell’utente. I neuroni ricevono in ingresso gli stimoli e li elaborano, l’elaborazione può essere anche molto complicata, ma in un caso semplice si può pensare che i singoli ingressi vengano moltiplicati per un opportuno valore detto ‘peso’. Il risultato delle moltiplicazioni viene sommato e nel caso in cui la somma superi una certa soglia il neurone si attiva ‘rendendo attiva’ la sua uscita. Il peso alto indica un ingresso molto importante, quello basso un elemento di lignaggio inferiore. Le connessioni che si vengono a stabilire fra i neuroni sono molteplici, ognuna dispone di un proprio peso e contribuisce al collegamento ingresso/uscita come si può osservare in fig.6.4.

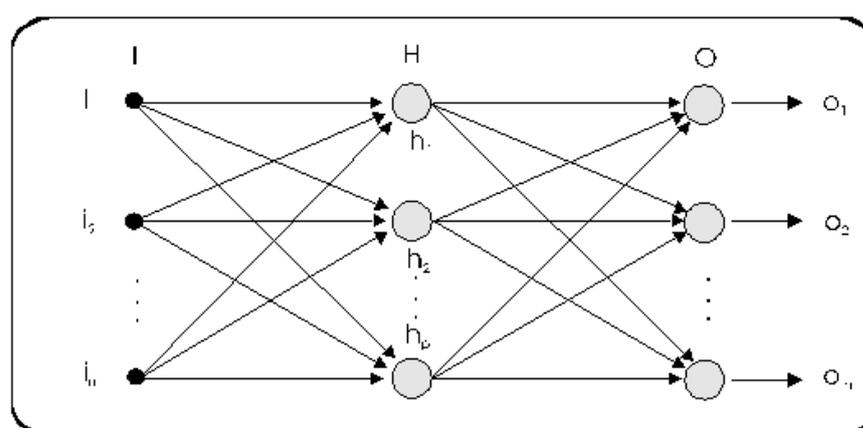


Fig.6.4 Rete neurale [fonte Internet Web]

Sopra è riportata una classica rete neurale pienamente connessa in cui i singoli neuroni vengono connessi ai neuroni successivi. Il primo strato corrisponde agli ingressi (I) dove le informazioni in entrata vengono adeguatamente alle esigenze dei neuroni. Il secondo strato nascosto (H, Hidden), è responsabile della vera e propria elaborazione e può essere composto da più colonne di neuroni. Il terzo strato è quello di uscita (O) che raccoglie i risultati e li adatta alle richieste del successivo blocco della rete neurale.

L'esempio della figura sopra riportata è molto semplice, infatti esistono reti neurali che coinvolgono migliaia di neuroni e decine di migliaia di connessioni. È possibile costruire reti neurali con più strati Hidden, però è dimostrato che pochi strati Hidden possono garantire lo stesso rendimento di un multi-Hidden nel momento in cui l'addestramento è stato fatto in modo opportuno.

Un punto di forza delle reti neurali è che sono in grado di trattare molti dati e di funzionare anche qualora alcune unità del sistema dovessero funzionare male. Industrialmente risultano efficaci quando si dispone di dati storici a partire dai quali estrarre dati e modelli senza effettuare prove e sperimentazioni.

Punti di debolezza sono l'efficienza condizionata dal fatto che le variabili predittive siano scelte con cura e la necessità di una fase di apprendimento piuttosto lunga, soprattutto quando il numero dei record e delle variabili analizzate è molto grande.

Applicazioni industriali:

In ambito produttivo le reti neurali trovano applicazione ove l'analisi statistica delle variabili risulti difficoltosa e dispendiosa in termini di tempo, ma soprattutto in quei campi dove le relazioni deterministiche esistenti tra le variabili non sono chiare. Tra questi troviamo la modellazione, la predizione, il controllo del processo produttivo, la classificazione e il riconoscimento di modelli, il clustering e l'ottimizzazione del ciclo di produzione.

Le reti neurali hanno applicazioni importanti anche nel settore del controllo di qualità delle produzioni industriali, con input rappresentato dal valore delle tolleranze massime accettabili sui prodotti realizzati. Nel momento in cui la rete neurale si trova di fronte alla realizzazione di un grande quantitativo di prodotti, basta far osservare al programma vari esempi di prodotti il cui standard qualitativo è già stato riconosciuto (sia in senso positivo che negativo). Conseguentemente la rete costruisce autonomamente un modello di tolleranze per poter giudicare quelle dei pezzi successivi e gestire scarti e rilavorazioni.

Fuzzy Logic (FL)

La **fuzzy logic** (o logica sfumata) è una tecnica di soft computing (come le reti neurali e gli algoritmi genetici) e rappresenta un'estensione della logica booleana in cui è possibile attribuire a ciascuna proposizione un grado di verità compreso tra 0 e 1. La differenza sostanziale fra la logica booleana e quella fuzzy è quindi che nella booleana il passaggio da uno stato all'altro è netto, in quella fuzzy avviene in modo meno brusco considerando le varie sfumature che esistono nel passaggio. La fuzzy logic permette di quantificare la vaghezza, una caratteristica può essere vera (=1) o falsa (=0), ma può anche assumere valori intermedi compresi nell'intervallo [0,1].

La nascita di questa logica può essere attribuita a Lotfi A.Zadeh, Professore all'Università di Berkeley che, cominciando a dubitare delle tecniche tradizionali, introdusse nel 1964 il concetto di *insieme sfocato* e *funzione di grado di appartenenza*, che mappa gli elementi di un universo in un intervallo reale continuo [0;1], e da cui derivò poi la 'logica sfumata'.

La realizzazione di un sistema fuzzy passa attraverso tre fasi fondamentali [78]:

- **Fuzzificazione.** Trasformazione di un valore numerico (*crisp*) in un sistema fuzzy;
- **Applicazione delle regole fuzzy.** Vengono applicate svariate regole (*rule base* o *Knowledge Base*). Vengono realizzati sottoinsiemi con metodi inferenziali. Per ottenere un unico insieme output si applica il metodo dell'unione (usando l'operazione *or*), il metodo della somma (sommando gli insiemi output) o il metodo del massimo;
- **Defuzzificazione del sistema fuzzy output individuato.** Per ottenere il corrispettivo numerico si individua il valore maggiormente rappresentativo tramite il metodo COG (in cui il valore *crisp* equivale al centro di gravità o baricentro della figura solida delimitata dall'insieme fuzzy output) o il metodo MOM (*crisp* ottenuto dal valore medio dei valori corrispondenti ai massimi delle funzioni membership dell'insieme fuzzy output) o altre metodologie.

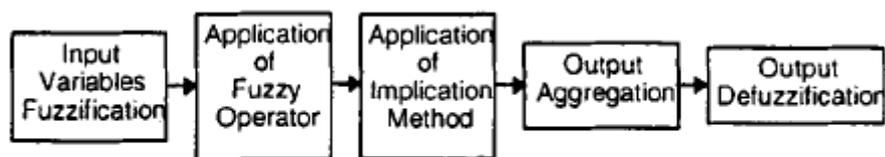


Fig. 6.12 Processo logico Fuzzy [74]

Applicazioni industriali

La prima applicazione industriale venne realizzata nel 1974 in Gran Bretagna con il primo sistema in grado di controllare un generatore di vapore basato su logica fuzzy. Attualmente sono molti i casi di utilizzo: dal sistema automatizzato per il controllo operativo dei treni nella metropolitana della città di Sendai, realizzato nel 1987 in Giappone (paese dove prima ha preso piede questa tecnica), ai prodotti d'uso comune come elettrodomestici e automobili, alla costruzione di modelli previsionali di economia, alla sismologia e alla diagnostica medica.

Rispetto ai sistemi esperti, quelli fuzzy dispongono di regole (anche contraddittorie) concatenate in parallelo a dispetto della successione in serie dei sistemi esperti, che permettono loro di gestire elementi di imprevedibilità (caratteristica non presente nei sistemi esperti), hanno inoltre bisogno di un numero di regole limitato e presentano un costo decisamente inferiore rispetto ai sistemi esperti. Per questo la fuzzy logic viene ampiamente utilizzata nel settore produttivo. In molti casi è integrata con un sistema di reti neurali, il che permette di ottenere un livello di risultato e un grado di affidabilità molto elevato. Le applicazioni in particolare riguardano la fase di design concettuale, parametrico e di configurazione, la fase di pianificazione del processo, la schedulazione, l'analisi del processo produttivo, il monitoraggio, la diagnosi, il controllo del processo e la fase di ispezione.

Genetic Algorithms (GA)

Gli algoritmi genetici appartengono alla 'computazione naturale', dove i programmatori creano modelli in riferimento a fenomeni biologici ispirati al principio della selezione naturale di Charles Darwin e sono rappresentati da metodi euristici di ricerca e ottimizzazione. Sono spesso utilizzati, nei settori meccanici e robotici, assieme a sistemi fuzzy per produrre le soluzioni più adeguate. Si tratta di algoritmi adattivi con capacità di apprendimento che vengono utilizzati in particolare nella ricerca, nel machine learning e nei problemi di ottimizzazione

Nelle fig. 6.13 e 6.14 viene rappresentato il procedimento che segue un algoritmo genetico. Le variabili sono combinate e codificate in una serie di stringhe binarie per formare i 'cromosomi'. Tramite il computer viene generata una popolazione casuale in continua evoluzione di questi cromosomi, che vengono classificati sulla base di una funzione *fitness* che aiuta nella risoluzione del problema. Le stringhe binarie sopracitate, denominate *fittest*, possono sopravvivere oppure riprodursi con altre stringhe mediante operazioni genetiche come il 'crossover' e la

‘mutazione’. È così disponibile un potente motore di ricerca in cui è necessario il bilanciamento tra sfruttamento ed esplorazione. Il risultato viene poi decodificato nel suo valore originario per rivelare la soluzione.

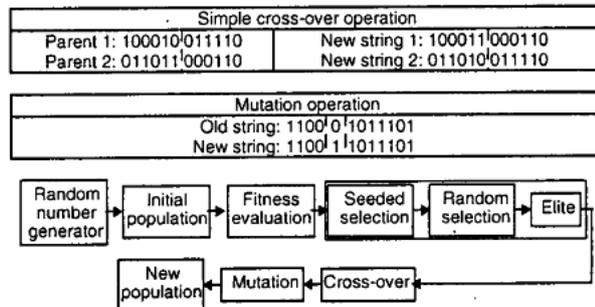


Fig.6.13 Struttura di un algoritmo genetico [74]

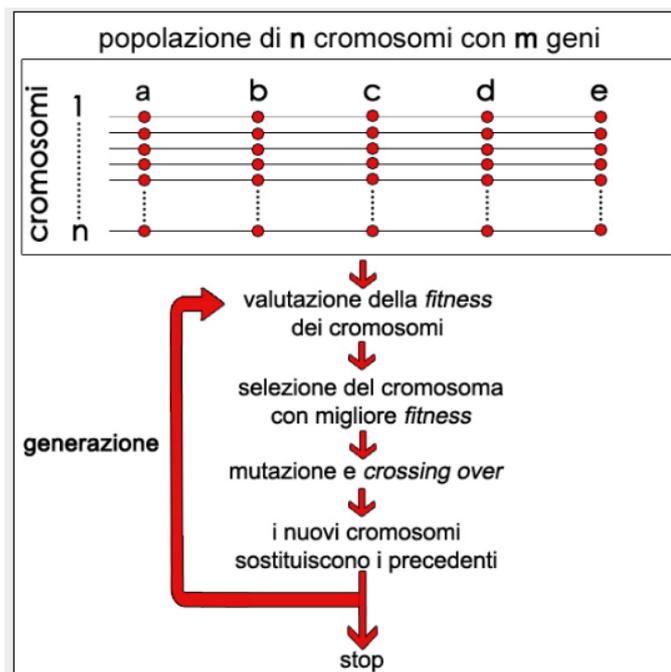


Fig.6.14 Modalità di lavoro di un algoritmo genetico [fonte Internet Web]

Applicazioni industriali

In ambito produttivo i GA possono avere molte applicazioni, al momento le più comuni sono nello scheduling, nell’allocazione delle risorse e in particolare nei problemi di scheduling nel Job-Shop.

Simulated Annealing

Gli algoritmi di Simulated Annealing (SA) derivano da un'analogia algoritmica con il processo di ricottura dei materiali, dove l'obiettivo è quello di portare il materiale ad uno stato di energia interna minima considerato ottimale in quanto i difetti reticolari della struttura metallica vengono minimizzati. Tale tecnica utilizza un parametro (temperatura) che viene diminuito in maniera iterativa fino a raggiungere valori prossimi allo zero. L'algoritmo genera punti casualmente in relazione ai quali viene individuata una funzione obiettivo che corrisponde alla migliore situazione (cioè quella di minima energia). Al fine del miglioramento della condizione del sistema vengono scelte nuove posizioni nell'ambito di un range all'interno del quale è possibile comunque soddisfarne i vincoli. Durante il procedimento i parametri non vengono mai modificati contemporaneamente. Una tecnica consiste nel proiettare le variabili in un sottospazio di dimensione inferiore e nel modificare solamente i parametri scelti. Gli algoritmi Simulated Annealing sono in genere utilizzati per risolvere problemi con variabili discrete, l'ottimizzazione di variabili continue richiede un adattamento dell'algoritmo.

Hybrid Systems

Allo scopo di sfruttare i vantaggi delle diverse tecniche presentate vengono spesso combinati diversi approcci in sistemi ibridi. In particolare sono frequenti sistemi che vedono integrati Knowledge Based Systems, Reti neurali e logica fuzzy come i neural-fuzzy, neural-genetic e fuzzy-genetic. Altro esempio più noto di sistema ibrido è il *data mining*.

Nelle aziende manifatturiere è ormai diffusa la presenza di *data warehouse* basi di dati informazionali (da distinguere da quelli operazionali più specificatamente riferiti alle operazioni eseguite in azienda) che raccolgono in un unico "magazzino" tutti i dati di interesse per l'azienda e relativi alla sua attività di business, sintetizzandoli, integrandoli e strutturandoli in modo tale da rendere agevole ed efficace la ricerca di informazioni [79]. Il *data mining* consiste nell'insieme di strumenti e tecniche utilizzate per estrarre dai dati informazioni "nascoste" a causa della mancata conoscenza dell'utente dovuta al numero di informazioni disponibili troppo elevato oppure alla sua impossibilità culturale di elaborarli [79]. Il data mining è principalmente realizzato tramite algoritmi e riconoscimento di modelli (pattern recognition) che dopo essere stati individuati, possono essere a loro volta utilizzati come punto di partenza per ipotizzare nuove relazioni di tipo causale tra fenomeni. Le tecniche di data mining sono molteplici [80]: statistica; tecniche di IA

quali reti neurali e algoritmi genetici; modelli di qualità grafici; clustering; alberi di decisioni, analisi delle associazioni, etc.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MANUFACTURING		
Funzioni Intelligenza Artificiale	Tecniche Intelligenza Artificiale	Ambiti di applicazione nella progettazione e produzione
Consiglio Comunicazione Controllo	Expert System (ES)	Design di prodotto, pianificazione processo produttivo, scheduling, assemblaggio.
Decision-making Goal-seeking Knowledge Apprendimento Pattern-recognition	Knowledge-based System (KBS)	Design di prodotto, manutenzione, diagnosi dei guasti, controllo delle macchine di produzione, pianificazione e schedulazione del processo produttivo, selezione delle risorse, produzione
Ragionamento Auto-miglioramento Auto-mantenimento Auto-organizzazione	Multi-Agent System (MA)	Design di prodotto, pianificazione di processo, pianificazione della produzione e allocazione delle risorse, controllo delle macchine di produzione, monitoraggio, diagnosi guasti, assemblaggio
	Neural Network (NN)	Design di prodotto, pianificazione della produzione, monitoraggio, controllo, riconoscimento pattern, Group Technology
	Fuzzy Logic (FL)	controllo
	Genetic Algorithm (GA)	Design, scheduling, allocazione delle risorse, analisi del processo produttivo
	Simulated Annealing (SA)	Design di prodotto, planning e production, scheduling
	Hybrid System (HS)	Design di prodotto, manutenzione, diagnosi guasti, controllo delle macchine di produzione, pianificazione e schedulazione del processo produttivo, selezione risorse, produzione

Tab.6.1 Funzioni e tecniche di Intelligenza Artificiale nella produzione

Per quanto riguarda le applicazioni il data mining è particolarmente efficace nell'ambito delle ricerche di mercato, in particolare della analisi della concorrenza per stabilire le quote di mercato di un'impresa e nel marketing per l'analisi e elaborazione delle preferenze dei clienti. In ambito produttivo un esempio di applicazione sono le informazioni relative ai reclami e al rilevamento di non conformità che possono essere utilizzate congiuntamente a quelle sui componenti utilizzati, permettendo così di rilevare frequenze particolari di guasti in corrispondenza all'uso di materiali di un determinato lotto, o di lavorazioni effettuate presso un certo centro [79]. Molti sono i software in grado di svolgere data mining: da Oracle a Microsoft SQL Server, da Weka in Java a Viscovery, piattaforma di analisi visuale.

Al fine di riassumere quali sono le funzioni e applicazioni più frequenti delle tecniche di Intelligenza Artificiale sopra descritte in ambito della progettazione e produzione è stata elaborata la tabella 6.1 in cui vengono evidenziate le applicazioni industriali più comuni e adatte a ciascuna tecnica. Resta comunque la considerazione di base che tutte le tecniche sono potenzialmente applicabili a quasi tutti gli ambiti di progettazione e produzione.

6.2 Architetture di sistemi produttivi

L'intelligenza artificiale è in grado di riconoscere pattern (modelli) e di eseguire facilmente compiti che l'uomo non è in grado di svolgere, per questo può essere applicata con successo ad un sistema produttivo.

In particolare l'IA consente di realizzare lo *scheduling* della produzione sulla base di vincoli opportunamente scelti e introdotti dall'utente, vagliando migliaia di possibilità fino a giungere alla soluzione ottimale del problema. Spesso il sistema per lo scheduling è integrato in un sistema Enterprise Resource Planning (ERP). Un server calcola il tempo di inizio e di fine delle operazioni in base agli ordini e alle capacità produttive. Quando un ordine è stato eseguito il sistema di scheduling aggiorna le informazioni e manda i risultati al server. Il sistema consente di fare delle previsioni su ciò che accadrebbe nel momento in cui si applicassero dei cambiamenti alla programmazione oppure se si apportassero variazioni alle capacità del sistema produttivo.

Altra possibile applicazione in ambito produttivo è il *controllo*. In questo caso le tecniche analizzano ed individuano quale delle passate produzioni si avvicina maggiormente agli obiettivi aziendali del momento. Il software calcola il processo migliore per il lavoro corrente e aggiusta automaticamente il settaggio produttivo per garantire la realizzazione del prodotto. Si riducono così i costi e l'inventario, oltre che crescere il livello del profitto.

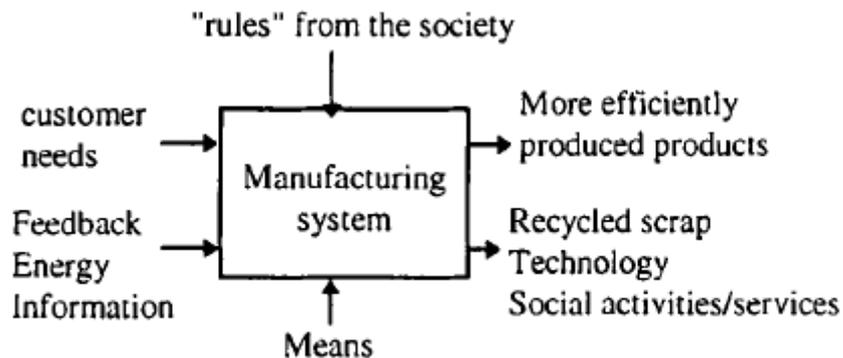


Fig.6.1 Rappresentazione schematica di un sistema produttivo [75]

Un sistema produttivo è rappresentabile come un insieme integrato di sottosistemi complessi che interagiscono fra di loro e secondo un loro utilizzo predeterminato raggiungono una serie di obiettivi comuni [75]. Il sistema trasforma efficientemente l'input in output tenendo in considerazione le varie specifiche produttive.

L'integrazione dei sottosistemi costituenti il sistema produttivo può essere ottenuta attraverso la condivisione di un database intelligente di sistema. Non si tratta di una semplice interfaccia, che permette solamente lo scambio di informazioni, bensì di un trasferimento di informazioni bidirezionale. Quest'ultimo obiettivo può essere ottenuto tramite [75]:

- un database di sistema per quei sottosistemi che non influenzano direttamente in modo forte ogni altro sottosistema;
- connessione diretta fra i sottosistemi che detengono un elevato livello di interazione;
- la considerazione del manufacturing system come un sistema distribuito. Sviluppare e implementare un'architettura di sistema aperto per l'integrazione.

Queste soluzioni consentono un aumento di flessibilità della produzione e in particolare ne migliorano la risposta in caso di eventi inaspettati come i guasti.

I sistemi produttivi sono oggi in trasformazione a causa della maggiore partecipazione del cliente nel processo produttivo e ad una diminuzione della dimensione dei lotti e dei tempi di consegna. I sistemi in grado di rispondere a queste nuove necessità devono disporre di caratteristiche come la modularità, la standardizzazione e un controllo aperto. I sistemi di produzione classici non risultano appropriati a fronteggiare questi tipi di cambiamento e pertanto l'applicazione di tecniche di IA al contesto produttivo costituisce al momento una delle possibilità più promettenti.

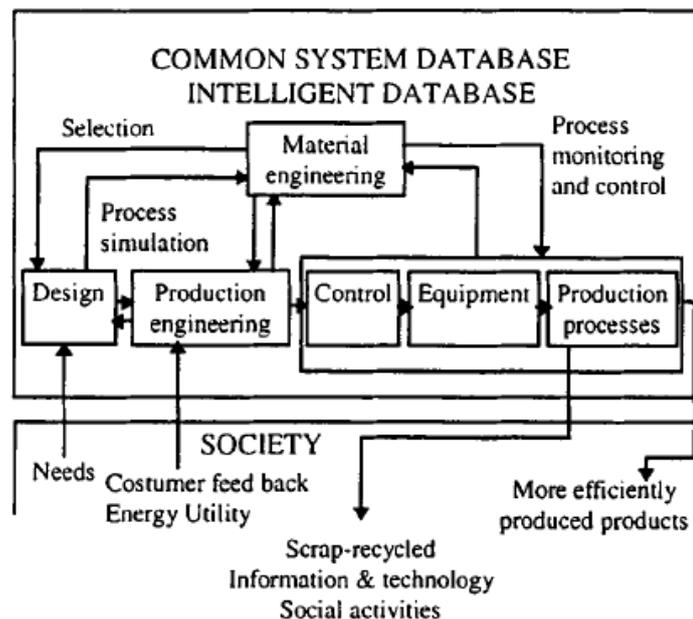


Fig.6.2 Vista di insieme del sistema manifatturiero dal punto di vista funzionale [75]

Al momento i tre principali sistemi manifatturieri basati su tecniche di intelligenza artificiale implicano l'assimilazione della cella manifatturiera alla cella del sistema e sono riconosciuti come: Bionic Manufacturing Systems, Fractal Manufacturing System, Holonic Manufacturing Systems [81]. Ciascuno viene di seguito sinteticamente descritto.

Bionic Manufacturing Systems (BMS) [75,81,82]

La parola *bionico* proviene da *biologia* e da *elettronico* e si utilizza per indicare l'applicazione industriale di metodi e sistemi trovati in natura. Nel caso di un sistema manifatturiero, le unità di produzione (work cells) possono essere comparate alle cellule di un sistema biologico e i coordinatori delle unità produttive agli enzimi che coordinano le cellule.

Gli ormoni del sistema biologico corrispondono alle strategie o politiche aziendali che hanno un effetto a lungo termine sul sistema. Tutto è quindi soggetto ad un controllo centralizzato, cioè le informazioni provengono dal top-level specificando i compiti che devono essere svolti nei livelli più bassi e le operazioni di tutte le celle sono riflesse nell'intero sistema che è pertanto in grado di reagire in modo rapido ai cambiamenti. In modo analogo alle cellule inoltre le diverse unità produttive possono riunirsi per formare "organi" cioè sottosistemi produttivi.

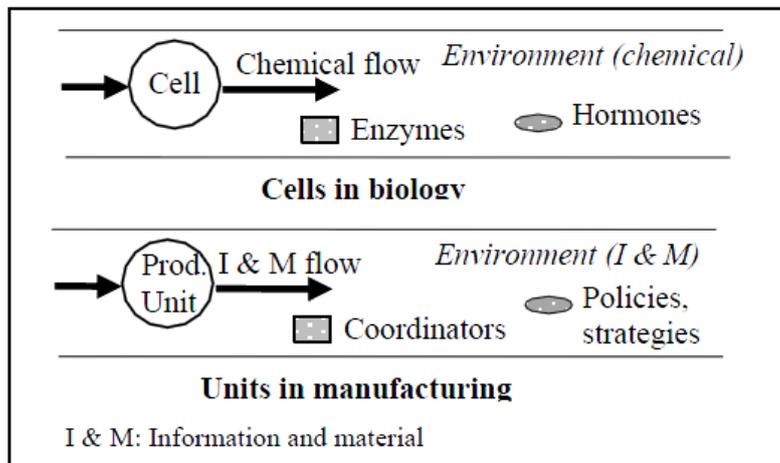


Fig.6.3 Somiglianza tra strutture biologiche e di produzione [81, 82]

Fractal Manufacturing System (FrMS) [75,81,82]

Il concetto di frattale ha origine dalla matematica e dalla teoria del caos e implica un nuovo approccio per gestire la inflessibilità e rigidità delle attuali organizzazioni. L'FrMS è un sistema aperto costituito da piccoli componenti definiti come unità frattali, le cui caratteristiche principali sono: self-similarity tra i frattali, ricorsione implicata, e pattern-inside-of-pattern.

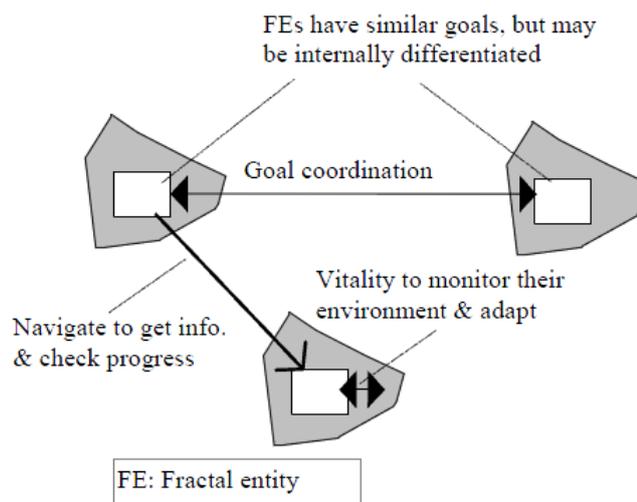


Fig.6.4 Rappresentazione grafica delle entità frattali [81]

Ogni unità frattale possiede le proprietà di auto-organizzazione, cioè non necessita una mediazione esterna per riorganizzarsi, somiglianza agli altri frattali ma struttura interna che può essere diversa, auto-ottimizzazione, cioè continua ricerca della migliore prestazione. Ogni frattale pertanto agisce in forma autonoma e con grande dinamicità per raggiungere i propri obiettivi ma collaborando con le altre unità per raggiungere un obiettivo comune.

Gli impianti Fractal dispongono di un sistema informativo e di navigazione efficiente e flessibile. Il sistema FrMS controlla continuamente le zone di destinazione, riconsidera la loro posizione e i progressi e apporta eventuali correzioni se necessario. In questo modo le strutture organizzative vengono costantemente ottimizzate da ogni singola unità.

Holonic Manufacturing Systems (HMS) [75,81,82,83]

Il concetto di sistema olonico deriva dalla ricerca svolta in ambito filosofico finalizzata alla definizione della natura ibrida delle strutture degli organismi viventi e dei gruppi sociali. In natura ogni sistema è costituito da parti e allo stesso tempo fa parte di qualcosa di più grande. Un holon è costituito da sotto-unità (altri holon) e, contemporaneamente, è una sotto-unità di un sistema più grande (costituito da altri holon). Le due caratteristiche predominanti di un'unità holon sono l'autonomia e la cooperazione. Mediante la prima un holon esprime la propria interezza e la capacità di regolarsi autonomamente, mentre la seconda implica la capacità di integrazione con altri holon. che possono essere pensati come un complesso sistema che, organicamente, integra vari sottosistemi intelligenti, secondo un'unica procedura distribuita.

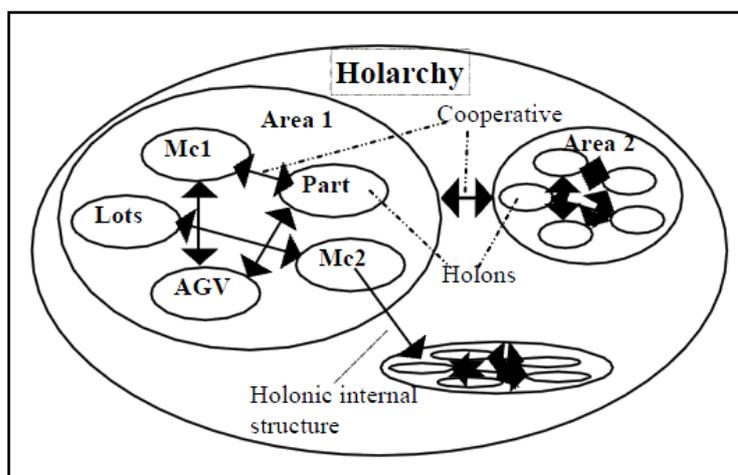


Fig. 6.5 Rappresentazione di un sistema Holonic [81]

Partendo dalla prospettiva secondo cui le celle di produzione hanno bisogno di essere strutturate come holon, è possibile pervenire ai criteri basilari nella costruzione di un sistema intelligente di produzione basato sull'architettura cellulare come rappresentato in figura 6.6.

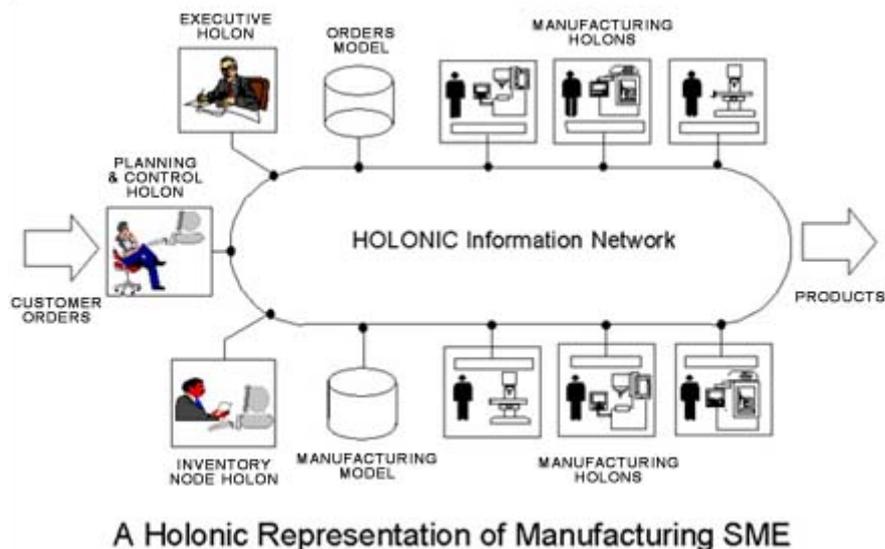


Fig.6.6 Rappresentazione di un sistema manifatturiero olonico [fonte Internet Web]

Nella tabella 6.2 si riporta un confronto tra le modalità di funzionamento dei tre sistemi produttivi organizzati secondo le tecniche di IA sopra riportati: si nota come i BMS corrispondono ad un controllo centralizzato, mentre gli FF ad una gestione autonoma delle singole celle e infine gli olonici ad un misto di queste due caratteristiche.

Concept	Type of Regulation		Type of Mechanism			Definition of Mechanism	
	Short term	Long term	Global	Hierarchical	Local	Pre-defined	Adaptation
BMS	Enzymatic action, CNS	Hormones	CNS	Enzyme, Hormones	Enzymatic action	Enzymes, Hormones, CNS	?
FF	Fractal navigation, JIT, Kanban	Vitality measures of environment	No	Goal coordination	Goal, JIT, Kanban	JIT, Kanban	On goals
HMS	Coordinators	No	No	Plan coordination	CN	CN	RL of coordination

JIT: Just in time, CNS: Central nervous system, CN: Contract-net., RL: Reinforcement learning

Tab.6.2 Confronto tra sistemi produttivi: bionici, frattali e olonici [81]

Il vantaggio principale dei sistemi produttivi basati su tecniche di IA, e in particolare di quello bionico, come mostrato in figura 6.7, è che consentono di ottenere una elevata flessibilità a fronte comunque di una dimensione del lotto accettabile, anche se in genere più ridotta rispetto Ai classici sistemi flessibili FMS, FMC e FMS.

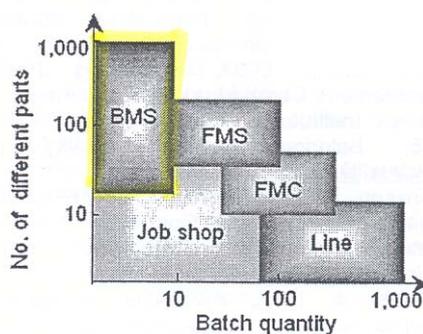


Figure 26: Optimum positioning of Biological manufacturing systems.

Fig. 6.7 Ottimo posizionamento dei sistemi produttivi bionici [13]

Le tecniche di Intelligenza Artificiale hanno pertanto interessanti applicazioni in ambito produttivo e in particolare possono essere utilizzate per il *calcolo di indicatori di produzione*, anche se al momento esistono ancora pochi esempi. In base alle considerazioni fatte è possibile ritenere che i Sistemi Esperti e quelli Multi-agent siano i più adatti a svolgere questo tipo di compito. I primi per la loro capacità di inglobare e aggiornare le conoscenze necessarie al calcolo dell'indicatore, i secondi grazie alle tecniche di coordinazione e di assegnazione dei compiti ai vari agenti fino ad arrivare alla computazione finale, che li caratterizzano.

L'analisi di queste metodologie risulta nel presente lavoro particolarmente significativa in quanto si tratta di *tecniche adatte al calcolo dell'indice di complessità*. In particolare sono stati utilizzati a tal fine i Sistemi Esperti, ai quali verrà dedicato un intero capitolo, e si farà riferimento nelle conclusioni alla Knowledge Based Engineering, che è un particolare tipo di KBS, come possibile ambito di applicazione dell'indice di complessità calcolato con il metodo qui proposto.

7. METODI DI CALCOLO DELLA COMPLESSITA' TECNOLOGICA DI PRODOTTO E DI SISTEMA PRODUTTIVO

7.1 Metodo 1: complessità misurata a partire dalla raccolta di dati oggettivi all'interno dell'impresa

Tra i primi metodi proposti al fine di un calcolo della complessità tecnologica ci sono quelli basati su dati oggettivi rilevati in azienda. Questa metodologia si applica meglio alla complessità di prodotto, in quanto oggetto definito attraverso un numero contenuto di variabili misurabili, mentre non è la più indicata nel caso del processo di produzione in quanto, se da un lato molti parametri del processo possono essere quantificabili, molti altri sono difficilmente misurabili e spesso è pertanto richiesta un'analisi tramite l'ausilio di interviste a operatori dell'azienda o comunque una quantificazione più sofisticata come vedremo nel paragrafo 7.4 dedicato al metodo entropico. Talvolta viene inoltre utilizzata la regressione lineare per affinare i risultati.

Si riporta di seguito una selezione di alcuni significativi articoli pubblicati dagli anni '90 ad oggi che propongono metodologie che elaborano dati rilevati in azienda al fine del calcolo della complessità.

Uno dei primi articoli relativi ad un calcolo di complessità basato su dati del prodotto e dell'azienda e affinamento con regressione lineare compare nel 1991 ad opera di **S Ramani, R. Venkatraman** [84]. Gli autori sono tra i primi a tentare un approccio quantitativo al problema della determinazione della complessità classificando i componenti industriali in base ad un *indice di complessità* che indichi se lavorarli con macchine tradizionali o a controllo numerico. In base al valore assunto dall'indice, il componente viene indirizzato ad una macchina tradizionale o CN, quindi l'indice costituisce un supporto fondamentale al processo di presa di decisioni. L'indice discriminante di complessità, al di là del quale modificare la modalità di lavorazione, viene determinato tramite la tecnica di regressione lineare.

Prendendo come esempio una lavorazione di foratura, si vuole trovare una regola che consenta di decidere se utilizzare un trapano a controllo numerico o un trapano convenzionale.

A tale scopo le variabili significative sono:

1. tempo di aggiustamento (non taglio) della macchina a controllo numerico CN
2. numero totale di fori

3. numero dei tipi di fori (classificazione dei tipi di fori)
4. numero totale di utensili richiesti (numero totale di operazioni)
5. media del rapporto numero di utensili/tipi di fori
6. profondità media (in mm)
7. profondità media/tipo di foro (in mm)
8. numero medio di attrezzaggi/tipi di fori
9. numero totale di attrezzaggi richiesti
10. numero di diametri di passo circolare
11. altezza media verticale tra i piani di lavoro (in mm)
12. distanza verticale tra il punto di riferimento e il piano di asportazione
13. numero di teste porta utensile
14. perimetro lungo il quale i fori sono posizionati (in mm.)
15. tempo di preparazione e programmazione della macchina CN
16. tempo senza asportazione in un banco di lavoro convenzionale

si selezionano quindi le variabili più significative fra le precedenti e si aggiungono:

1. quantità di scorta
2. quantità totale richiesta per la produzione
3. indice di lavorabilità del materiale.

A partire da queste variabili vengono individuate quelle significative attraverso una regressione lineare realizzata con un programma al calcolatore, in cui si confrontano i valori misurati delle variabili con un indice PCT (valore di inclusione) che rappresenta la proporzione minima sulla variazione totale per la variabile per risultare significativa. Il PCT viene calcolato a sua volta attraverso una regressione lineare sulle variabili dipendenti:

1. tempo di aggiustamento (non taglio) della macchina a controllo numerico CN
2. tempo di preparazione e programmazione della macchina CN
3. tempo di taglio della macchina convenzionale
4. tempo di aggiustamento (non taglio) della macchina convenzionale

Si procede quindi alla misurazione delle variabili nel caso di un gruppo di macchine CN o di un gruppo di macchine convenzionali e, sulla base di queste, si effettua la selezione delle variabili più significative calcolando quali provocano una variazione sensibile dell'indice di discriminazione sulla base della varianza richiesta. La selezione avviene quindi sulla base del PCT che rappresenta il valore di inclusione, ovvero la porzione minima della varianza totale di una variabile da sottrarre affinché questa entri nella regressione lineare come indice significativo per

valutare l'indice di discriminazione. Sulla base del PCT scelto si avranno previsioni più o meno precise, si incomincia la valutazione con un PCT = 0,01 che include le prime 12 variabili, rimarranno stazionarie le prime sei variabili con un PCT variabile da 0,02 a 0,05 e per un PCT = 0,06 avremo solo 4 variabili. Di conseguenza si considerano come significative per la regressione lineare che si intende effettuare solo le prime 5 variabili che permettono un elevato grado di precisione con una certa stabilità. Come anticipato vengono poi aggiunti gli ultimi 3 parametri elencati. A partire dal valore delle variabili si classificano in base a tale funzione i componenti nei due gruppi e si determina un punteggio medio per ciascun componente e uno discriminante che costituisce il termine di paragone per la classificazione. Si procede quindi alla regressione lineare di ciascuna delle variabili considerate ricavando per ognuna un coefficiente di discriminazione. L'indice di complessità considerato da Ramani, ovvero la funzione di discriminazione, si ottiene quindi moltiplicando ogni variabile per il suo coefficiente di discriminazione precedentemente ottenuto tramite regressione lineare, tale funzione rappresenta la linea di separazione fra l'utilizzo di macchine tradizionali e CN per la produzione del pezzo e consente di dividere i gruppi di componenti in lavorabili tramite macchina convenzionale e tramite CN. Lo scopo dell'indice è definire una regola di decisione valida per ogni tipo di pezzo considerato sulla base della differenza fra punteggio discriminante (indice di complessità) e punteggio medio del gruppo di lavorazione (in genere un valore prossimo allo 0). Per valori positivi si procederà all'assegnazione del pezzo al gruppo di macchine a controllo numerico, viceversa si produrranno i pezzi con macchine tradizionali.

La regola di decisione può essere riassunta come segue:

- se $|\text{punteggio medio per macchina CN} - \text{punteggio discriminante}| < |\text{punteggio medio per macchina convenzionale} - \text{punteggio discriminante}|$ ➡ si assegna la lavorazione alla macchina CN
- se $|\text{punteggio medio per macchina CN} - \text{punteggio discriminante}| > |\text{punteggio medio per macchina convenzionale} - \text{punteggio discriminante}|$ ➡ si assegna la lavorazione alla macchina convenzionale

da queste conclusioni si ottengono un livello di accettazione della macchina CN e uno di quella convenzionale.

- se $|\text{livello di accettazione CN} - \text{indice di complessità}| < |\text{livello di accettazione della macchina convenzionale} - \text{indice di complessità}|$ ➡ si assegna la lavorazione alla macchina CN

- se $|\text{livello di accettazione CN} - \text{indice di complessità}| > |\text{livello di accettazione della macchina convenzionale} - \text{indice di complessità}|$ ➡ si assegna la lavorazione alla macchina convenzionale

Il punteggio discriminante è:

- a) velocemente e facilmente disponibile per un componente
- b) differente per ogni componente e quindi unico
- c) ci consente la decisione rapida di assegnare il componente alla macchina CN o alla macchina convenzionale

Pertanto il punteggio discriminante è l'*indice di complessità del componente*.

Considerazioni sul metodo di Ramani, Venkatraman

La metodologia di valutazione messa a punto da Ramani-Venkatraman consente di valutare la complessità in funzione di variabili oggettive rilevabili direttamente in azienda, questo tipo di studio è molto interessante da un punto di vista ingegneristico perché fornisce una misurazione della complessità raffrontabile tra più imprese dello stesso settore. La metodologia risulta però molto specifica e legata al tipo di industria manifatturiera considerata dagli autori. Per altri prodotti come ad esempio i microchip o gli elettrodomestici tale metodologia non è applicabile. Ciononostante i parametri considerati valutano alcuni aspetti basilari per la definizione di complessità. Malgrado il metodo non tratti in modo approfondito la complessità di forma, alcuni parametri considerati, quali il numero di fori e gli attrezzaggi, sono variabili relative alle interfacce fra pezzo e pezzo e fra pezzo e macchine operatrici che può essere opportuno considerare in un calcolo della complessità. La regressione lineare finale delle variabili è inoltre una modalità di calcolo che può essere considerata efficace nel calcolo della complessità, sebbene quest'ultima non vari sempre in modo lineare rispetto a tutti i parametri.

Punti di forza:

- utilizza dati del sistema analitici e oggettivi
- applicazione abbastanza semplice
- individuazione di un indice unico che esprime la complessità del sistema
- fornisce un chiaro supporto alla presa di decisioni del management di produzione, nello specifico alla scelta tra macchine tradizionali e CN
- risultati affidabili e di facile interpretazione

Punti di debolezza:

- elevato numero di informazioni richieste
 - applicazione a un caso specifico, in altri casi occorre ridefinire i parametri significativi e calcolare il relativo indice
 - necessità di un software piuttosto articolato di supporto per la elaborazione dei dati.
-

Nel 1993 *W.C.Benton e R.Srivastava* [85] misurano la complessità e ne considerano l'effetto sulla struttura del prodotto, sulle decisioni relative alla dimensione dei lotti di produzione, sul costo totale dei sistemi e sul livello del servizio al cliente in diversi contesti manifatturieri.

Gli autori notano che in precedenza la complessità di prodotto era definita a partire da due fattori:

- profondità (numero di livelli del prodotto)
- larghezza (numero di componenti di un livello)

Gli estremi corrispondono a un sistema di produzione in serie (profondo) e a un sistema di puro assemblaggio (ampio). La maggior parte dei prodotti tendono comunque ad avere una struttura che si colloca tra questi due estremi.

La complessità è pertanto caratterizzata da più dimensioni, affrontarla con un approccio di una sola dimensione è piuttosto limitato, ma utilizzare tutte le possibili dimensioni potrebbe essere troppo complesso per permettere l'analisi efficace del problema.

Gli autori introducono una terza dimensione rispetto alle due sopra citate:

- numero di operazioni (o fasi di lavoro) da realizzare per la produzione del prodotto.

A partire da queste considerazioni viene pertanto messo a punto un indice di complessità strutturale del prodotto sviluppando un modello di simulazione della pianificazione della capacità di giacenza basato su tre fattori operazionali:

- procedure di dimensionamento dei lotti quali: quantità ordinata periodicamente (POQ); tempo di ordine (MOM); ultimo costo totale (LTC)
- un indice di complessità strutturale (P)
- un fattore di capacità (CAP) che rappresenta vari livelli di risorse rispetto alla capacità di giacenza.

Per ogni tipo di procedura si calcola in funzione della complessità il livello di capacità richiesta e i costi totali del sistema sulla base del presupposto che prodotti equivalenti avranno una simile

evoluzione dei costi in relazione alla politica adottata. Per prodotti equivalenti si intende in questo caso prodotti con un uguale numero di punti di stoccaggio, un concetto utile per confrontare la complessità strutturale di prodotti diversi.

Si definisce così un *indice di complessità di struttura di prodotto* (product system complexity index)

$$psci = \delta \times \beta \times \eta$$

in cui

δ è la profondità per prodotto originale (ovvero il numero di livelli in un prodotto)

β è la larghezza del prodotto originale (ovvero il numero di parti per livello)

η è il numero di operazioni necessarie per la produzione di una parte n.

Esempio:

Definizione degli indici di complessità della struttura di quattro prodotti che vengono realizzati attraverso un sistema manifatturiero a cinque fasi e rappresentati graficamente nelle figure in seguito riportate.

Assemblaggio di un computer: le parti acquistate vengono utilizzate per l'assemblaggio del prodotto finito fig 7.1.1 - 1.

$$psci_a = 1 \times 4 \times 1 = 4.0$$

Strutture di prodotto che derivano da una integrazione di fabbricazione e assemblaggio. Il prodotto finito può richiedere pesanti operazioni di macchina che richiedono un misto di parti comprate, fabbricate e sub-assemblate fig. 7.1.1. - 2 e fig. 7.1.1. - 3.

$$psci_b = [(1+1+2)/3] \times [(1+1+2)/3] \times 3 = 5.33$$

$$psci_c = [(1+2)/2] \times [(2+2)/2] \times 2 = 6.00$$

Tipico grafico che rappresenta il prodotto di una industria di processo, per esempio benzina prodotta a partire da petrolio grezzo fig. 7.1.1 - 4.

$$psci_d = [(1+2+3+4)/4] \times [(1+1+1+1)/4] \times 4 = 10.00$$

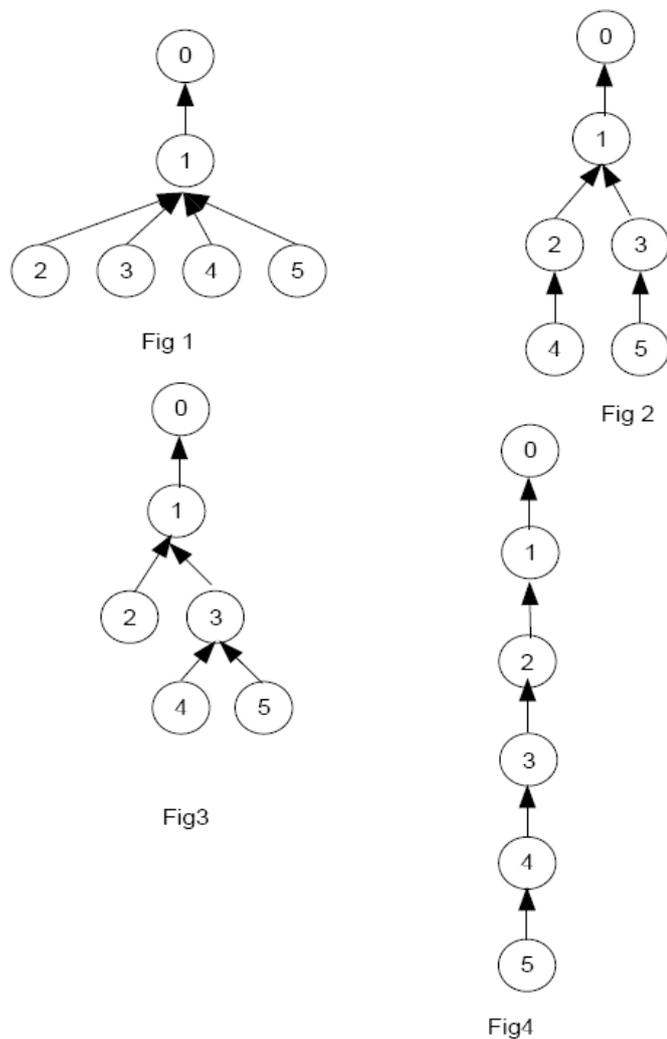


Fig. 7.1.1. Definizione degli indici di complessità della struttura di quattro prodotti realizzati attraverso un sistema manifatturiero a cinque fasi [85]

L'indice di complessità aumenta dal caso 1 al caso 4, il valore maggiore viene pertanto calcolato nel caso dell'industria di processo.

La seconda parte del lavoro si focalizza sulla relazione della complessità di prodotto con altri fattori determinanti nella definizione e valutazione del sistema produttivo.

Tali fattori sono:

- la procedura per la scelta della dimensione del lotto
- la capacità produttiva
- il tempo che intercorre tra l'ordine e il prodotto finito

- il coefficiente di variazione che misura il grado di ammassamento dei componenti finiti.

Con riferimento ai quattro casi sopra riportati si dimostra che all'aumentare della complessità della struttura del prodotto aumentano i costi totali. In particolare i fattori che influiscono più fortemente sui costi sono: la complessità di struttura del prodotto e la procedura di scelta della dimensione dei lotti, che risultano pertanto elementi strategici nella gestione dell'impianto produttivo. All'aumentare dei costi però non corrisponde un crescente miglioramento del servizio.

Il presente lavoro dimostra quindi come la complessità di prodotto può aumentare la difficoltà di gestione (in questo caso delle giacenze) e i costi minando l'efficienza del sistema produttivo.

Considerazioni sul metodo di Benton e Srivastava

Punti di forza:

- utilizza dati del sistema analitici e oggettivi
- individua un indice unico
- applicazione semplice e generica applicabile a diversi sistemi
- facile interpretazione dei risultati

Punti di debolezza:

- attendibilità dei risultati discutibile (a parità di fasi, la complessità di un'industria di processo risulta la più elevata seguita da quella di un'industria mista di fabbricazione e assemblaggio mentre la minore è quella di un'industria di assemblaggio puro. Infatti il numero di diverse operazioni in sequenza porta a valori dell'indice più elevati rispetto a quelli di industrie la cui produzione si basa sulla stessa operazione svolta su più componenti).

Nel 1997 **Joseph Sarkis** [86] non fornisce una misura diretta della complessità ma la correla alla efficienza del sistema introducendone alcuni significativi indicatori. Fornisce invece una definizione indiretta considerando la complessità dipendente dal numero di macchine a controllo numerico e di robot industriali all'interno del sistema manifatturiero.

Gli investimenti nei sistemi manifatturieri flessibili (FMS) e in altre tecnologie avanzate di produzione hanno lo scopo di ottenere benefici come una qualità più alta dei prodotti, riduzioni di tempo, WIP più ridotto e un certo numero di altri risultati prestazionali. Un sistema FMS è

costituito da più macchine a controllo numerico e/o robot industriali, interconnessi da sistemi di trasporto, che forniscono l'intero ciclo di produzione sotto un controllo centrale computerizzato.

I dati presi in considerazione in quest'articolo sono tratti dalla FMS World Data Bank che comprende dati relativi a caratteristiche e misurazioni di performance di oltre 800 FMS. A partire da tali dati viene sviluppata l'analisi della correlazione fra efficienza e complessità di sistema negli FMS secondo il modello della metodologia DEA (Data Envelopment Analysis) dove la complessità, variabile principale e considerata input di un FMS, è misurata semplicemente come la somma del numero di robot I_1 necessari per la mobilitazione interna dei semilavorati e il numero delle macchine a controllo numerico o celle di fabbricazione I_2 e considerando come output, nonché indicatori dell'efficienza relativa agli FMS i seguenti:

- riduzione del tempo di consegna (Lead Time, LTR) primo output (O_1) ovvero il tempo che intercorre fra l'emissione dell'ordine e la consegna al cliente
- riduzione del Work-In-Progress (WIP, O_2) ovvero l'ammontare di materie prime, semilavorati, componenti e gruppi costruttivi presenti all'interno del sistema produttivo che sono in lavorazione o in coda
- riduzione del magazzino (INR, O_3) che varia da sistema a sistema
- riduzione di operatori addetti (PER, O_4) ovvero la percentuale di riduzione del personale a seguito dell'implementazione di un nuovo sistema
- riduzione del costo unitario (UCR O_5) a seguito dell'implementazione di un nuovo sistema

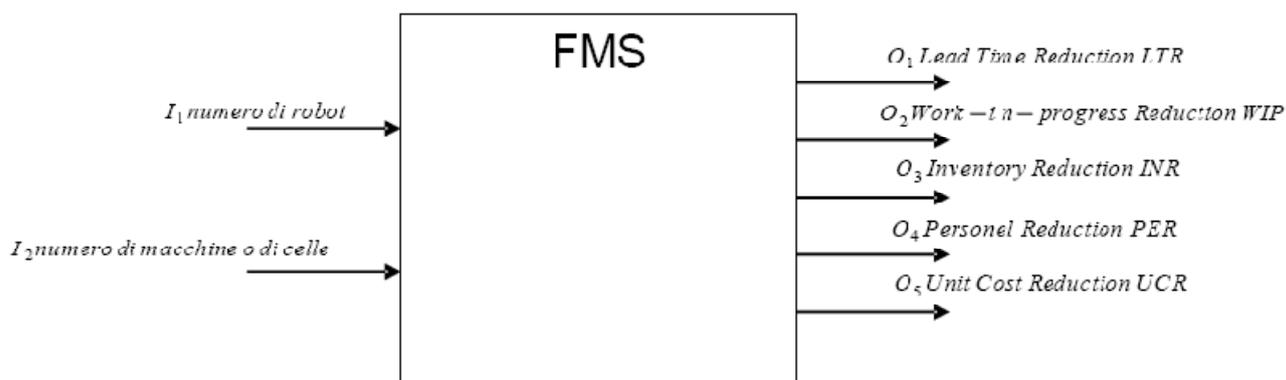


Fig.7.1.2 rappresentazione grafica di input e output in un sistema FMS

La generica misura dell'efficienza utilizzata nel modello DEA è data dalla formula:

$$E_{ks} = \frac{\sum_y O_{sy} v_{ky}}{\sum_x I_{sx} u_{kx}}$$

dove E_{ks} è la misura dell'efficienza o della produttività dell' s -esimo FMS usando i pesi di prova k , O_{sy} e I_{sx} sono rispettivamente il valore dell'output $y = (1 \dots 5)$ o dell'input x (1 o 2) per l' s -esimo FMS mentre u_{kx} e v_{ky} sono rispettivamente i pesi assegnati per l' s -esimo FMS all'input x e all'output y con le condizioni

$E_{ks} \leq 1$ per qualsiasi FMS s

E

$$u_{kx}, v_{ky} \geq 0$$

Questa formulazione di un problema non lineare è equivalente al problema lineare

$$\max \left\{ E_{kk} = \sum_y O_{ky} v_{ky} \right\}$$

con condizioni

$E_{ks} \leq 1$ per qualsiasi FMS s

$$\sum_x I_{kx} u_{kx} = 1$$

$$u_{kx}, v_{ky} \geq 0$$

la risoluzione del quale porta ad un valore ottimale di efficienza "semplice" (o tecnica) E^*_{kk} pari al massimo a 1. Se $E_{kk} = 1$ significa che non esistono altri FMS più efficienti del FMS k -esimo calcolato con i pesi scelti per misurarlo. Viceversa se $E^*_{kk} < 1$ l'FMS k -esimo non si trova sulla frontiera e quindi esiste almeno un FMS s per cui $E^*_{kk} < E^*_{sk}$.

Uno dei problemi principali di questo approccio è che spesso l'efficienza semplice porta a dei falsi positivi, ovvero all'esistenza di un FMS ottimale semplice quando in realtà la sua efficienza è inferiore di altre. Questo perché è possibile che il peso di un input o di un output sia

sovrastimato. Per ovviare a questo inconveniente si prende in considerazione l'efficienza incrociata (ovvero la stima dell'efficienza del s-esimo FMSs tramite i pesi dell' FMSk con $k \neq s$) in tal caso, con due o più FMS è possibile costruire una matrice delle efficienze incrociate del tipo

$$\begin{pmatrix} E_{11} & E_{12} & \dots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \dots & E_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ E_{n1} & E_{n2} & \dots & E_{nn} \end{pmatrix}$$

in cui la colonna k-esima misura le efficienze incrociate dell'FMS k-esimo di conseguenza la media di ogni colonna è un'ottima stima dell'efficienza di un FMS dato che la sovrastima di un peso è compensata dalla caduta degli altri.

Una possibilità di errore nel calcolo dell'efficienza incrociata media sta nel fatto che i pesi utilizzati per calcolare l'efficienza ottimale semplice non siano unici. Per far fronte a questa difficoltà utilizzeremo la seguente formulazione del problema proposta da precedenti autori:

$$\min \sum_y (v_{ky} \sum_{s \neq k} O_{sy})$$

con condizioni

$$\sum_y (u_{ky} \sum_{s \neq k} I_{sy}) = 1$$

$$\sum_y O_{ky} v_{ky} - E_{kk} \sum_x I_{kx} u_{kx} = 0$$

$E_{ks} \leq 1$ per qualsiasi FMS con $s \neq k$

$$u_{kx}, v_{ky} \geq 0$$

Questo modello ha come obiettivo primario quello di ottenere una media dell'efficienza incrociata massima e l'obiettivo secondario di trovare dei pesi che minimizzino l'output aggregato degli altri FMS. Una variante meno "aggressiva" a questa formulazione è data dal calcolo del massimo della funzione obiettivo della precedente formulazione.

Ricapitolando avremo:

- massima Efficienza semplice (o tecnica) – l'efficienza calcolata con il modello base

- Efficienza incrociata semplice – ovvero la media delle efficienze semplici di un FMS calcolate tramite i pesi trovati per gli altri FMS
- Efficienza incrociata “aggressiva”- la misurazione media dell'efficienza di un FMS k ottenuta moltiplicando i pesi ottimali di un FMS k
- Efficienza incrociata “leggera”- la misurazione media dell'efficienza di un FMS k ottenuta moltiplicando i pesi ottimali di un FMS k.

In base al rapporto output produttivi/input produttivi si verifica che i sistemi più efficienti sono i meno complessi.

Considerazioni sul metodo di Sarkis:

Lo studio di Sarkis fornisce buoni spunti di riflessione per arrivare a formulare un nuovo metodo di calcolo della complessità e prove del *legame tra complessità e indicatori di prestazione produttiva*, tema ampiamente affrontato nel capitolo 2 . Il calcolo di un indice di efficienza correlato con il numero di macchine dell'impianto dimostra come, per far fronte ad un determinato livello di complessità interna, l'azienda peggiori il suo grado di efficienza. Tuttavia il calcolo della complessità di sistema basato esclusivamente sul numero di macchine e robot impiegati presenta dei limiti in quanto rende del tutto impossibile i raffronti fra aziende di diverso settore, inoltre è poco descrittivo del sistema, delle regole di programmazione, dei processi potenziali e di quelli già effettuati, e dei suoi stati.

Nel 1997 *V.D.R. Guide, JR., R.Srivastava, M.E.Kraus* [87] partendo dall'indice definito da Benton e Srivastava [85], forniscono una definizione di *complessità totale di struttura di prodotto* nell'ambito dell'industria produttiva di recupero, cioè riferendosi ai processi in un sistema produttivo che trasformano prodotti usati, per allungare il ciclo di vita di un prodotto e per recuperare il materiale.

La complessità totale di un prodotto di tipo m C_m viene misurata a partire da tre dimensioni:

- *complessità di riassettaggio*: dipendente dal numero di unità che devono essere coordinate per riassembleare il prodotto. E' necessario fare un raffronto fra le complessità delle varie strutture di prodotto, i prodotti con maggiori unità da manipolare per il riassettaggio sono ovviamente i più complessi.

- *complessità di profondità*: il numero di livelli nella distinta base dei materiali (dove 0 è il prodotto finito). In termini di complessità di profondità il prodotto con il più alto numero di livelli nella distinta dei materiali (il più verticale) è considerato più complesso di quelli con meno livelli.
- *complessità di preparazione della lavorazione (routeing)*

$$C_m = C_{am} \times C_{dm} \times C_m$$

in cui

$$C_{am} = \frac{N_m}{N_{max}}$$

è la *complessità di riassettaggio* per il prodotto tipo m, funzione del numero di unità che devono essere coordinate per riassemble il prodotto.

e

N_m è il numero di unità che devono essere coordinate per riassemble il prodotto tipo m

N_{max} è il numero massimo di unità che devono essere coordinate per riassemble qualsiasi tipo di prodotto nell'ambiente di riferimento

$$C_{dm} = \frac{NL_m}{NL_{max}}$$

è la *complessità di profondità* per il prodotto tipo m funzione del numero di livelli nella distinta base dei materiali (0 corrisponde al prodotto finito)

dove

NL_m è il numero di livelli nella distinta dei materiali per il prodotto tipo m

NL_{max} è il massimo numero di livelli nella distinta dei materiali per tutti i tipi di prodotto nell'ambiente di riferimento

$$C_{rm} = \frac{Max\{R\}}{NR_{max}}$$

è la complessità di preparazione della lavorazione (routeing) per il prodotto tipo m, cioè il numero massimo di operazioni richieste per ogni parte in una unità.

dove

$$R_j = \sum OF_{ij}$$

$\{R\}$ è la serie di j parti di un tipo di prodotto m

R_j è il numero di percorsi di operazioni richiesto per il componente tipo j

OF_{ij} è la probabilità che la parte j richieda di essere sottoposta all' i -esima operazione

NR_{max} è il massimo numero di percorsi di operazioni per ogni componente di qualsiasi tipo di prodotto nell'impianto.

In media il numero delle operazioni per routing varia da 20 a 30 per ciascun componente.

C_m ottenuto dal prodotto delle 3 complessità sopra definite assume valori compresi tra 0 e 1.

Di seguito alcuni esempi in cui si ottengono i seguenti valori di C_m :

- $C_m = 0.08$ prodotto di struttura semplice
- $C_m = 0.22$ prodotto di struttura intermedia
- $C_m = 0.67$ prodotto di struttura elevata

Ai fini della valutazione di prestazione produttiva gli indicatori considerati sono:

- tempo di flusso: tempo medio che il "lavoro" (prodotto in lavorazione) permane nel sistema
- ritardo medio: ritardo medio di tutti i lavori completati
- RMS ritardo: radice quadrata media del ritardo per i lavori completati dopo la data pattuita
- percentuale di ritardo: percentuale di lavori completati dopo la data pattuita.

I risultati dimostrano che il valore dei 4 fattori aumenta con l'aumentare della complessità di struttura di prodotto. Pertanto la misura della complessità dovrebbe precedere le decisioni riguardanti la gestione della produzione in quanto influisce fortemente sulle prestazioni dell'impianto produttivo.

Considerazioni sul metodo di Guide, Srivastava e Kraus

E' interessante notare come questa metodologia applicata ad un contesto di riassetto o rilavorazione consideri un fattore decisivo relativo all'ambiente e al processo, ovvero la complessità di percorso o di routing, e quindi la probabilità di usare una certa attrezzatura. Rispetto ad lavori qui vengono considerate pertanto le risorse disponibili e la probabilità del loro utilizzo. Il problema della complessità di routing o di percorso verrà in seguito ripreso da altri autori, e costituisce un significativo aspetto della definizione di complessità.

Altro aspetto da sottolineare è il *legame tra complessità e indicatori di prestazione produttiva* che emerge anche in questa trattazione. Srivastava svilupperà successivamente un metodo probabilistico con l'utilizzo della funzione entropica per il calcolo della complessità di sistema, quindi adotterà la metodologia che va per la maggiore. Altra osservazione è che il presente metodo si riferisce solo a prodotti assemblati, mentre nel caso di altri prodotti diventa inapplicabile.

Punti di forza:

- utilizza dati del sistema analitici e oggettivi
- individua un indice unico
- applicazione semplice e valida per diversi settori e prodotti
- facile interpretazione dei risultati

Punti di debolezza:

- applicazione ad un caso molto specifico, cioè la fase di produzione dedicata al recupero di prodotti, cioè alle sole operazioni di riassettaggio.
-

7.2.1 Metodo 2: complessità definita attraverso interviste agli operatori aziendali

Sono molti gli autori che in passato e tutto'ora scelgono di calcolare la complessità tecnologica a partire da valutazioni espresse da operatori aziendali. Infatti è il personale interno all'azienda a dover svolgere mansioni finalizzate alla produzione di un prodotto, pertanto queste persone sono in genere in grado di esprimere valutazioni e attribuire punteggi per questo calcolo.

Nel capitolo 10 verranno introdotte alcune linee guida al fine della elaborazione di questionari e in allegato G vengono illustrate alcune tecniche utilizzate per l'elaborazione di questionari e relativi dati tra cui la tecnica Likert e il fattore Alfa di Cronbach, a cui si fa riferimento in seguito nella presente sezione.

Il lavoro di ricerca e studio di diverse pubblicazioni attinenti l'argomento ha permesso la selezione di alcuni articoli significativi dove la complessità viene calcolata tramite l'utilizzo di questionari somministrati ai tecnici dell'azienda, dei quali si riportano di seguito i punti salienti.

Nel 1995 *M. H. Meyer e K. F. Curley* [88], ipotizzano una metodologia interessante per la valutazione di complessità di un sistema informatico, a partire dalla complessità delle competenze e conoscenze necessarie allo sviluppo del software. A tale scopo viene somministrato un questionario all'interno di 108 imprese produttive, dotate di sistemi informatici gestionali di supporto alla presa di decisioni, considerando che lo sviluppo di un sistema di questo tipo avvenga secondo due dimensioni di complessità: la *complessità di conoscenza* e la *complessità tecnologica*.

Gli autori definiscono la *complessità di conoscenza* come la complessità relativa alla conoscenza del settore specifico e alla presa di decisioni che viene supportata dall'applicazione in oggetto e la *complessità di tecnologia* come la complessità che caratterizza la tecnologia informatica usata per sviluppare, integrare e diffondere l'applicazione.

La loro teoria si basa sull'esame dei risultati del questionario, che dimostrano come nello sviluppo delle applicazioni software la complessità di conoscenza sia combinata con la complessità di tecnologia.

Rispetto alle aree delineate è possibile individuare diverse combinazioni e quattro possibili sistemi:

- sistemi di produzione personali ovvero singoli PC (personal productivity system)

- sistemi a elevato peso decisionale: è il caso di un sistema informatico semplice che richiede però l'intervento e la decisione di più persone, come nel caso del sistema di controllo di un impianto chimico (knowledge intensive system)
- sistemi ad alta tecnologia: si tratta di reti di computer con singoli operatori, non necessariamente con grosso peso decisionale, come ad esempio le casse di un supermercato, o una rete di vendita di una catena (technology intensive systems)
- sistemi strategici: ogni computer collegato alla rete modifica continuamente il quadro generale dell'impresa, è il caso per esempio di una compagnia di assicurazioni i cui terminali non servono solo a registrare polizze e contratti ma soprattutto a valutazioni statistiche sulla base delle quali vengono prese decisioni sul tipo e quantità di polizze da emettere (strategic system).

In figura 7.2.1 sono rappresentati i quattro sistemi in funzione della complessità della conoscenza e della complessità della tecnologia.

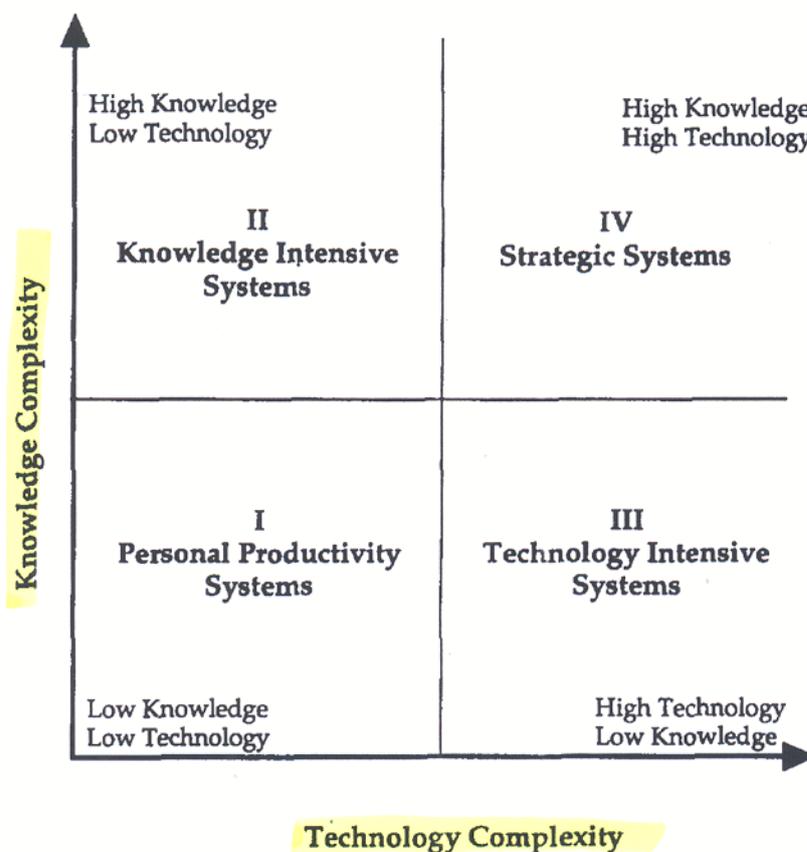


Fig.7.2.1 Quattro generici tipi di applicazioni software, classificate in base alla complessità di conoscenza e di tecnologia [88]

Per definire la *complessità di conoscenza*, si considera che la presa di decisioni coinvolga tre livelli diversi:

1. la conoscenza di colui che prende la decisione
2. l'informazione usata da colui che prende la decisione
3. l'interpretazione e sintesi dell'informazione sopra, applicando la logica dello specifico settore, per risolvere l'incertezza e prendere decisioni complete o parziali.

Pertanto per calcolare questa complessità gli autori considerano che esistono tre componenti alla base delle decisioni: la conoscenza dei paradigmi di un determinato campo di chi prende le decisioni, le informazioni base usate da chi decide e le interpretazioni e la sintesi di quest'ultime secondo l'applicazione di una logica specifica per risolvere l'incertezza ed arrivare ad una decisione. A partire da queste tre componenti vengono sviluppate sette variabili, per ognuna delle quali viene implementata una scala di valutazione:

- *Ampiezza dei campi di presa di decisioni AD*: numero di campi distinti specifici di competenza in cui si prendono le decisioni chiave, i cui metodi sono incorporati in un sistema esperto.

Descrizione	punteggio
Un solo campo	1
Due campi distinti	2
Tre o più campi distinti	3

- *Profondità dei campi di presa di decisioni PD*: combinazione del livello di formazione specifica con la durata dell'esperienza lavorativa richiesta a coloro che prendono le decisioni chiave, cioè livello di esperienza relativa ai diversi campi di decisioni necessarie per le decisioni chiave.

Profondità	Descrizione	punteggio
comune	Per essere considerati esperti non c'è la necessità di aver maturato conoscenze avanzate del campo decisionale o grande esperienza	1
profonda	Per essere esperti è necessario ho un elevato grado di maturazione delle conoscenze oppure un'elevata esperienza	2
massima	Sono necessarie sia un alto grado di formazione sia alta esperienza	3

- *Tasso di cambio dei campi di presa di decisioni VC*: misura la frequenza con cui coloro che prendono decisioni diventano inefficaci, in quanto non aggiornati, nel risolvere il problema, cioè misura la frequenza con cui le competenze diventano obsolete e gli ambiti decisionali cambiano.

velocità	descrizione	punteggio
bassa	Ogni cinque anni ed oltre	1
moderata	Ogni due anni circa	2
elevata	Annualmente	3

- *Penetrazione dei campi di presa di decisioni GCT*: sintetizza il livello di completezza del sistema computerizzato per ognuno dei campi specifici inclusi nel sistema, ovvero il grado di computerizzazione dell'area decisionale.

Grado di compenetrazione	punteggio
basso	1
parziale	2
moderato	3
sostanziale	4
completo	5

- *Comprensione degli output di decisione EO*: misura in cui il sistema risolve i problemi e supporta le decisioni, cioè misura la categoria degli output, ovvero il numero di tipi di soluzioni che possono essere trovate per ogni singolo problema:

- | | |
|-------------------------|----------------------|
| - diagnosi del problema | - soluzioni attuali |
| - azioni raccomandate | - test delle ipotesi |

Output decisionale	punteggio
Solo un tipo di soluzione	1
Due tipi qualsiasi	2
Tre tipi qualsiasi	3
Tutti e quattro i tipi	4

- *Ampiezza degli input di informazione AI*: numero degli input di informazione per il sistema, ovvero il numero di tipi di informazione richiesti per prendere le decisioni.

Ampiezza dell'input di informazioni	punteggio
Uno o due tipi di input	1
Tre o quattro tipi di input	2
Cinque o più tipi di input	3

- *Interpretazione degli input di informazione II*: punteggio relativo al bisogno di interpretazione degli input da parte di colui che prende le decisioni. In alcuni casi l'informazione base è semplice ed inequivocabile, in molti altri invece sono possibili più interpretazioni di una stessa informazione che sono quindi più o meno ambigue

Livello di ambiguità	descrizione	punteggio
basso	È richiesto poco o nessuno sforzo di interpretazione	1
moderato	È richiesta una qualche interpretazione dell'input	2
alto	È richiesto un alto sforzo di interpretazione	3

La *complessità di conoscenza* risulta pertanto data dalla seguente formula:

$$CC = \frac{(AD \cdot 20 + PD \cdot 20 + VC \cdot 20 + GCT \cdot 12 + EO \cdot 15 + AI \cdot 20 + II \cdot 20)}{4.2}$$

Cioè:

Complessità di conoscenza: [Ampiezza dei campi di presa di decisioni*20)+(Profondità dei campi di presa di decisioni *20)+(Tasso di cambio dei campi di presa di decisione*20) + (Penetrazione dei campi di presa di decisioni*12) + (Comprensione degli output di decisione*15) + (Ampiezza delle informazioni di input*20) + (Interpretazione delle informazioni di input*20)]/4.2

Si definisce ora la *complessità di tecnologia*:

- *Diversità di piattaforme VP*: grado al quale un sistema é portato attraverso differenti architetture di computer e sistemi operativi. Si tratta di una stima di quanto il sistema possa essere composto da diverse architetture di computer, ovviamente più è elevato il numero di queste, maggiore sarà la complessità tecnologica del sistema. Nel '95, anno di

pubblicazione dell'articolo, le architetture principali erano VAX e IBM e i sistemi operativi DOS, Unix, VMS o CICS.

Numero di diverse architetture	punteggio
Una singola architettura	1
Due tipi di hardware e sistemi operativi	2
Tre o più tipi di hardware e sistemi operativi	3

- *Diversità di tecnologia VT*: la presenza di più tipi di tecnologie di sviluppo e la necessità di integrazione fra loro aumenta sostanzialmente la complessità tecnologica.

Vengono catalogati sette diversi tipi di tecnologie di sviluppo (alcuni delle quali già presentate nel capitolo 6):

- linguaggi e ambienti basilari di sviluppo (knowledge-based development languages and shells)
- reti neurali (Neural networks)
- grafica (Graphics)
- sistemi di gestione di banche dati DBMS (Data Base management systems)
- fogli di calcolo (Spreadsheets)
- immagini (Imaging)
- vocale (Voice).

La presenza di più tipi di tecnologie di sviluppo e la necessità di integrazione fra loro aumenta sostanzialmente la complessità tecnologica.

Un punteggio aggiuntivo viene attribuito per ciascuna tecnologia aggiunta da 1 a 7.

- *Intensità di Database (Data Base Intensity) DBI*: dimensione del database in Megabytes. È la misura dello spazio di memoria richiesto dal database aziendale, va da 1 a 3 e divide i database in minori di 1 Mb di memoria, da 1 a 10 Mb, e più di 10 Mb (la classificazione proposta nell'articolo è in realtà oggi obsoleta, si potrebbe attualmente ipotizzare un equivalente in Terabyte, ma ciò che conta è la metodologia).

Valori: meno di 1 Megabyte = 1, da 1 a 10 Megabytes = 2, più di 10 Megabytes = 3.

- *Intensità di rete IU*: uso della rete di computer per accedere ad altre applicazioni o database da un dato sistema. Questa variabile misura l'intensità di utilizzo del lavoro in rete di più computer.

Intensità di utilizzo della rete	punteggio
Sistemi isolati	1
Uso non frequente	2
Uso regolare	3

- *Sforzo di programmazione basato sulla decisione/conoscenza FP*: numero di regole e dimensione totale dell'archivio di conoscenza, ovvero fatica decisionale o competenza di programmazione FP (anche in questo caso la scala proposta è ormai obsoleta).
Valori: meno di 500 regole o 550 k = 1, da 500 a 1500 regole e tra 500 e 1.5 Megabytes = 2, più di 1500 regole e maggiore di 1.5 Megabytes = 3.
- *Diversità di sorgenti di informazione VSI*: numero di sorgenti di informazione (le reti moderne avrebbero un numero di accessi maggiore quindi anche in questo caso il sistema è obsoleto).
Valori: da 1 a 3 database sorgenti = 1, 3 o 4 database sorgenti = 2, 5 o più database sorgenti = 3.
- *Diffusione DS*: numero di utilizzatori nell'azienda, ovvero ampiezza della rete e come questa è distribuita all'interno dell'azienda.

Livello di diffusione	punteggio
Un singolo utente	1
Due o tre utenti in un dipartimento	2
Tre o più utenti in un dipartimento	3
Più utenti in diversi dipartimenti	4
Utilizzo di una rete aziendale integrale	5

- *Integrazione di sistemi SIS*: grado di programmazione e altri sforzi tecnici richiesti per integrare il sistema esperto con sistemi informativi esistenti. Questa variabile misura le competenze necessarie a far sì che le varie architetture informatiche dialoghino fra loro e con il sistema informatico.

Livello di integrazione del sistema	punteggio
Nessun fattore	1
Poco lavoro	2
Lavoro moderato	3
Un maggiore sforzo	4
È il lavoro più difficile	5

La complessità tecnologica TC è:

$$TC = \frac{VP * 10 + VT * 5 + DBI * 10 + IU * 10 + FP * 10 + VSI * 10 + DS * 6 + SIS * 6}{2,4}$$

*Complessità di tecnologia: [(Diversità di piattaforme*10) + (Diversità tecnologiche*5) + (Intensità di database*10) + (Intensità di rete*10) + (Sforzo di programmazione basato sulla decisione/conoscenza*10) + (Diversità di sorgenti di informazione*10) + (Diffusione*6) + (Integrazione di sistemi*6)]/2.4*

Ad ogni fattore viene pertanto attribuito un punteggio da 1 a 3 o da 1 a 5 assegnato dai manager del sistema gestionale di riferimento, mentre i pesi derivano dalla necessità di normalizzare su una unica scala variabili definite su scale diverse.

La conclusione alla quale perviene l'indagine è che una gestione efficace dello sviluppo del sistema informativo dell'azienda dipende dalla complessità racchiusa nel sistema.

Sono infine significative le conclusioni che riguardano durata e costi dei progetti: la complessità della tecnologia ha un impatto maggiore sul costo del progetto rispetto alla complessità della conoscenza, mentre quest'ultima influisce più fortemente sulla durata.

Considerazioni sulla metodologia di Meyer e Curley:

Il lavoro è uno dei più significativi degli ultimi anni in merito alla complessità e in particolare delinea una metodologia di indagine che utilizza questionari ed elabora i relativi risultati tramite somme pesate. A testimonianza dell'importanza del metodo il fatto che verrà poi ripreso e messo

a confronto con la metodologia entropica di Frizelle e Woodcock [100] dai già citati A. Calinescu, J. Efstathiou, J. Schirn, J. Bermejo [10]

Significativo inoltre è la valutazione della relazione con la durata e i costi dei progetti, e le conclusioni tratte sull'influenza della complessità di tecnologia e di conoscenza su tali aspetti.

Punti di forza:

- semplice da applicare
- rapido in relazione al numero di persone intervistate
- costi ridotti
- risultati diretti e di facile interpretazione

Punti di debolezza:

- soggettivo e dipendente dalla disponibilità a collaborare delle aziende coinvolte
 - applicabile solo ad un ambito specifico
 - non considera tutte le origini della complessità di un sistema produttivo
-

Nel 2000 *I. Barclay e Z. Dann* [88] propongono un Assessment Tool and Methodology (ATM) costituito da un questionario a partire dai cui risultati è possibile un calcolo di un indice di complessità tecnologica e al quale si è per alcuni aspetti ispirato il questionario proposto nel capitolo 10 del presente lavoro.

Obiettivo della metodologia è consentire:

- valutazione dello sviluppo prodotto passato
- valutazioni interne (confronto di prodotti di successo con prodotti di meno successo)
- valutazioni esterne di sviluppo rispetto a best practice esterne
- stima di pre-sviluppo di prodotto

Lo strumento è un questionario in cui vengono individuati alcuni differenti aspetti della complessità, le cui domande sono suddivise in tre sezioni, ciascuna mirata ad approfondire uno specifico aspetto.

In particolare vengono individuati due tipi di complessità:

- *complessità strutturale*: relativa agli aspetti fisici del prodotto e pertanto facile da definire.
- *complessità funzionale*: relativa a percezione, uso, estetica, molto difficile da definire.

Altri aspetti che vengono valutati attraverso il questionario sono:

- novità del prodotto

- complessità di progetto
- vincoli commerciali

La *complessità strutturale* si misura a partire da cinque categorie principali:

- numero di componenti: considerato il più comune indicatore di complessità nel caso di prodotti assemblati
- numero di fasi del processo di fabbricazione
- grado di non linearità o connettività relativo al numero di interfacce tra componenti e forza di interrelazione tra i componenti
- numero di tecnologie: elettrica, fluido meccanica, elettronica, termodinamica, meccanica, software, chimica, materiali
- livello di difficoltà tecnologica di progettazione, fabbricazione e assemblaggio

livello di supporto tecnologico. Questo si è rivelato essere l'aspetto più difficile tra quelli strutturali da valutare attraverso le interviste.

La *complessità funzionale* è definita in termini di:

- numero delle funzioni/criteri di prestazione
- grado dei criteri di prestazione
- apparenza (estetica, sicurezza, stile, conforto, gusto, odore, tessitura, usabilità ecc.)

Viene definita anche una *complessità di progetto* relativa allo sviluppo del prodotto:

- numero di giorni/uomo di lavoro
- numero di discipline coinvolte
- numero di persone coinvolte nello sviluppo del prodotto all'interno dell'azienda
- numero di progettisti coinvolti nel progetto
- numero di persone coinvolte nel progetto esterne alla azienda

Ulteriori indicatori si riferiscono a:

- novità del prodotto
- vincoli commerciali:
 - qualità di prodotto
 - costi di sviluppo del prodotto
 - legislazione
 - tempi di sviluppo del prodotto
 - livello di competizione nel mercato per il prodotto
 - vita del prodotto

Le risposte alle domande vengono fornite in termini di punteggi, che sono raggruppati in diversi intervalli, oppure in base alla tecnica Likert e includendo la risposta NA (Not Applicable) come ad esempio nelle domande di seguito riportate:

Sezione *complessità strutturale*:

- indicare il numero di componenti:

< 50	51 – 100	101– 150	151– 200	201– 250	251 - 300	301 - 350	351 - 400	401- 450	> 450	NA
M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	MNA

-indicare il numero di materiali usati nel prodotto:

1 o 2	3 o 4	5 o 6	7 o 8	9 o 10	11 o 12	13 o 14	15 o 16	17 o 18	> 18	NA
M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	MNA

Sezione *complessità funzionale*:

- i bisogni del cliente per il prodotto erano ambigui (scala Likert base 7)

Molto in disaccordo							Molto in accordo	NA
1	2	3	4	5	6	7		NA

Il questionario è stato inviato a 100 aziende delle quali 41 lo hanno restituito compilato.

I punteggi ottenuti vengono quindi elaborati al fine di svolgere operazioni di benchmarking tra diversi prodotti e aziende e migliorare l'intero sviluppo del prodotto.

In particolare il metodo consente di confrontare prodotti di successo di natura dissimile ma di grado di complessità e di novità simili, individuando le fasi di sviluppo del prodotto critiche che possono essere migliorate.

Allo scopo del presente lavoro è importante soffermarsi sulla metodologia anziché sui risultati dell'inchiesta.

Considerazioni sulla metodologia di I.Barclay e Z.Dann:

Certamente l'idea di valutare la complessità di un prodotto attraverso un questionario che focalizzi diversi aspetti della complessità stessa, in particolare distinguendo tra quella strutturale e funzionale è molto interessante.

Punti di forza:

- applicazione valida per diversi settori e prodotti
- metodologia semplice e di facile applicazione
- utilizza molteplici dati del sistema (sia oggettivi che soggettivi in termini di punteggi attribuiti tramite intervista)

Punti di debolezza:

- se da una parte l'applicazione è valida per diversi settori, può però viceversa risultare troppo generica e portare a risultati poco efficaci
- considera molti dati soggettivi e quindi la validità è subordinata alla somministrazione di un numero elevato di questionari quindi presenta costi complessivi di realizzazione elevati
- mancano indicazioni chiare su come ricavare un indice di complessità del prodotto.

Nel 2001 *S. Novak e S.D. Eppinger*. [90] utilizzano il metodo delle interviste ai fini di calcolare la complessità individuando tre elementi nella complessità di prodotto, con riferimento in particolare alla categoria automotive:

1. numero dei componenti del prodotto da specificare e produrre
2. il grado di interazione tra questi componenti
3. il grado di novità del prodotto, fattore invece escluso da autori precedenti quali Barclay e Dann [88].

Le variazioni nella complessità di prodotto derivano da un numero elevato di fattori quali scelte prestazionali, tecnologia e architettura di prodotto.

La complessità nel progetto del prodotto e l'integrazione verticale della produzione vengono considerati complementari: la produzione interna è considerata preferibile quanto più il prodotto è complesso, in quanto si mantengono i benefici dell'investimento fatto nelle competenze necessarie per coordinare lo sviluppo e la produzione del prodotto complesso.

La complessità del sistema produttivo viene misurata utilizzando una tecnica di regressione lineare a partire dal seguente sistema di due equazioni:

complessità di prodotto:

$$\text{CMPLX} = \beta_{10} + \beta_{11}\text{PERF} + \beta_{12}\text{MAJ} + \beta_{14}\text{SKLZ} + \beta_{15}\text{TECH} + \beta_{16}\text{SNK} + \beta_{17}\text{PLAT} + \gamma_1\text{VERTINT} + \varepsilon_1^{14}$$

varia da 0 (minima) a 1 (massima)

integrazione verticale:

$$\text{VERTINT} = \beta_{20} + \beta_{23}\text{CAP} + \beta_{26}\text{SNK} + \beta_{27}\text{VOL} + \beta_{28}\text{UNION} + \beta_{29}\text{PLAT} + \gamma_2\text{CMPLX} + \varepsilon_2^{15}$$

rappresenta l'integrazione verticale dell'azienda cioè la percentuale dei componenti del sistema prodotti in casa

dove

PERF misura la prestazione del sistema

MAJ indica i cambiamenti nella progettazione del prodotto, uguale a 1 quando il design del prodotto (nel presente caso veicolo) viene profondamente modificato rispetto allo standard

SKLZ riflette la presenza dell'effetto dell'abilità del lavoratore sulla localizzazione dello stabilimento

TECH indica lo stato della tecnologia

SNK misura i costi sommersi/investimenti di impianto

PLAT requisito di piattaforma: si riferisce al fatto che il componente sia utilizzato per più di un veicolo

CAP è una variabile che indica la capacità e il potenziale di produzione di un impianto

VOL misura il volume del veicolo

UNION requisito di unione: dipende dalla misura in cui la produzione viene effettuata all'interno dell'impresa, in base a un accordo definito di unione, è uguale a 1 quando il componente è prodotto in casa.

A tutti i fattori sopra definiti vengono attribuiti valori da 0 a 1 sulla base di interviste al personale dell'azienda produttiva.

Come si evince dal sistema a due equazioni sopra, la complessità è correlata al tema dell'origine del prodotto, cioè della misura in cui i componenti vengono prodotti all'interno o all'esterno dell'azienda.

Le osservazioni fatte confermano che ci sono benefici nel concentrare la produzione dei sistemi complessi in casa e di produrre in out-sourcing i sistemi più semplici, il che implica che è necessaria una coordinazione tra i progettisti e gli agenti che si occupano degli acquisti per una ottimizzazione delle prestazioni dell'azienda.

Nel 2003 *A.M. Sanchez e M.P. Perez* [91] misurano la complessità tecnologica di prodotto come percentuale delle vendite fatte dei sottosistemi e componenti. La complessità viene valutata a partire da un'indagine svolta nell'ambito dell'industria spagnola dei fornitori di componenti automobilistici attraverso una valutazione di fattori quali pratiche, metodologie e attività di collaborazione utilizzate nell'azienda. Agli intervistati viene richiesto di assegnare un valore, in base alla scala a sette punti Likert (vedi allegato G), da 1 (uso estremamente ridotto) a 7 (uso estremamente alto) all'estensione dell'uso delle diverse pratiche individuate all'interno della propria azienda, tali valori vengono correlati tramite tecniche di regressione lineare al numero di impiegati, rappresentativo della dimensione dell'azienda.

Tecniche e metodologie indagate:

- organizzazioni aperte
- dimensione dei lavori
- autonomia dell'impiegato
- rotazione del lavoro
- standardizzazione
- tecnologia di gruppo
- CAD/CAE
- team interfunzionali per le innovazioni
- organizzazione dei fornitori
- sviluppo delle partnership

- acquisti Just In Time
- benchmarking
- ingegneria concorrente
- prototipazione rapida
- analisi del valore
- design for manufacturing
- collaborazione nell'addestramento
- collaborazione nello sviluppo del prodotto
- collaborazione nello sviluppo del processo
- collaborazione nella qualità, ambiente ecc.
- collaborazione nel trasferimento di tecnologia
- collaborazione nel marketing.

L'indagine dimostra che la complessità tecnologica di prodotto è negativamente correlata al tempo e costo di sviluppo, ma allo stesso tempo si constata che le imprese caratterizzate da una complessità tecnologica più alta sono quelle che usano le tecniche più avanzate più frequentemente, pertanto l'influenza della complessità sulla modalità di realizzazione del prodotto ha un aspetto bivalente come già sottolineato nella tabella 1.1 dell'introduzione.

Nel 2004 **Ross Chapman e Paul Hyland** [92] definiscono quattro tipi di complessità:

- *complessità di prodotto* il numero di distinti componenti e il tipo di relazioni tra loro (semplice, chiaro o complesso)
- *complessità di processo* il numero delle distinte fasi di produzione e il tipo di relazioni tra loro (semplice, chiaro o complesso)
- *complessità tecnologica* il numero di tecnologie essenziali (che influiscono direttamente sul vantaggio competitivo dell'azienda) coinvolte nello sviluppo e produzione del prodotto
- *complessità di interfaccia con il cliente* il livello di difficoltà nell'interpretare i requisiti dei clienti.

ogni tipo di complessità viene calcolata a partire da interviste svolte sul management dell'azienda che consentono di attribuire un punteggio sulla base di una scala Likert (vedi allegato G).

Per esempio la complessità di prodotto viene valutata attraverso domande del tipo:

Quanto sono complessi la maggior parte dei prodotti della Sua azienda?

- pochi distinti componenti e relazioni tra questi semplici e chiare

punteggio 1

- Scambio di opinioni sulle informazioni sulla concorrenza tra manager e impiegati.

Controllo finanziario:

- Obiettivi finanziari
- Quota di mercato
- Interesse degli azionisti
- Competitività a breve termine.

Sviluppo del prodotto:

- Numero crescente e tipologia di prodotti/servizi
- Introduzione di nuovi prodotti/servizi
- Espansione del range di business e dei mercati
- Miglioramento del processo di produzione.

Processo di produzione:

- Processo produttivo flessibile per rispondere ai bisogni del mercato
- Tempo di set-up
- Costo di set-up.

I dati raccolti dimostrano che quando la pressione per il cambiamento viene dall'ambiente esterno per fronteggiare la complessità di tale ambiente viene scelto l'approccio di controllo strategico, quando la pressione invece proviene da dentro l'organizzazione viene privilegiato un controllo di tipo finanziario.

Nel 2007 *Zhuo Zhang, Qunhui Luo* [94], utilizzano il metodo Delphi (vedi allegato G) per individuare degli indicatori che consentano di calcolare la complessità di prodotto.

Gli autori partono dalla considerazione che la complessità di prodotto non solo influenza il ciclo di sviluppo dello stesso ma influenza il costo di produzione, la qualità, il servizio e la soddisfazione del cliente. Inoltre la complessità ha anche una forte influenza sull'organizzazione della produzione e sulla modalità di gestione del produttore. E' quindi uno dei più importanti fattori da considerare per un'impresa nel suo processo di sviluppo del prodotto. Un prodotto non è solo un sistema complesso ma un processo complesso. Per ottimizzare il progetto di un prodotto e valutare le possibili alternative è importante potere valutare la complessità di prodotto. La misura può essere fatta a partire da tecnologia, dimensione, organizzazione e ambiente.

Dal punto di vista del ciclo di vita del prodotto, un prodotto è un sistema, che funzionalmente include tecnologia, caratteristiche fisiche, e caratteristiche estese. Il cuore del

sistema è la tecnologia coinvolta nel prodotto. Se il prodotto comporta molte differenti tecnologie, o una tecnologia immatura, è più probabile che il sistema prodotto sia complesso. Il secondo livello sono le caratteristiche fisiche del prodotto, inclusi volume, componenti, e struttura e relazioni tra questi componenti. Quando la dimensione è piccola o grande a una certa estensione la complessità del prodotto aumenta. Il livello esterno del sistema è costituito dalle caratteristiche estese del prodotto. La complessità risultante da produzione e servizio è in parte relativa al cuore e al livello fisico. Eliminando l'impatto di questi due livelli, la complessità della produzione e del servizio deriva dall'organizzazione del processo e dall'ambiente.

Basandosi su questa analisi del sistema prodotto, è facile dedurre che la complessità è determinata da quattro dimensioni: tecnologia, dimensione, organizzazione, e ambiente.

Il fattore *tecnologia* può essere ricondotto a 2 sub-fattori: il numero di tecnologie coinvolte nel prodotto e la maturità di ciascuna tecnologia. Il numero di tecnologie può essere determinato a partire da un sistema di classificazione della tecnologie. E la maturità di ciascuna tecnologia può essere definita in termini di: nuova tecnologia, nuova piattaforma tecnologica, nuova categoria tecnologica, e nuova tecnologia innovativa ad alto rischio.

La *dimensione* del prodotto è determinata da numero, volume, e densità. Il numero si riferisce al numero di componenti classicamente proporzionale alla complessità, il volume è la dimensione dello spazio che il prodotto occupa fisicamente, un volume troppo piccolo o troppo grande può aumentare la complessità di prodotto rispetto ad un volume che è adeguato per contenere i componenti o soddisfare le operazioni. La densità è relativa ai componenti e al volume.

L'*organizzazione* qui significa i fattori umani che influenzano la complessità del prodotto nei processi di fabbricazione e di servizio, in termini del numero di persone e dipartimenti coinvolti nelle operazioni relative al sistema prodotto, il numero di informazioni che si trasferiscono tra le persone e i dipartimenti nei processi e lo stile di allocazione delle risorse. L'aumento di tutte queste entità coinvolte causa un aumento di complessità.

L'*ambiente* indica le interrelazioni e interazioni tra sistema prodotto e condizioni esterne. L'aumento del numero di fornitori, clienti, regole e standard e competizione di mercato da origine ad un incremento di complessità del sistema prodotto.

Gli autori propongono un sistema di misura della complessità di prodotto basato su due livelli di indicatori. Il primo livello include i 4 aspetti della tecnologia, dimensione, organizzazione e ambiente. Il secondo livello di indicatori è costituito dalle scomposizioni dei 4 indicatori di primo livello. Il valore degli indicatori viene valutato utilizzando la tecnica Delphi (vedi allegato G).

A parte il volume quindi tutti gli indicatori sono variabili crescenti con la complessità e vengono determinati a partire dal giudizio di un pool di esperti. E' così possibile determinare delle categorie di bassa, moderata e alta complessità, a seconda di dove ricade il valore dell'indicatore. Ad ogni indicatore viene attribuito un opportuno peso sempre definito a partire dal giudizio degli esperti e si giunge alla definizione di un coefficiente unico calcolato dall'equazione:

$$\sigma^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_j)\eta_j$$

in cui:

m è il numero di variabili che concorrono alla complessità di prodotto

k è il numero di livelli di complessità considerata (ex. 3 bassa, moderata, alta)

$f_j^k(x_j)$ é la funzione pesata per ogni variabile

η_j è il peso attribuito dagli esperti ad ogni variabile.

Questo coefficiente pertanto fornisce un modello per valutare la complessità non solo del prodotto di per sé stesso nella sua tecnologia e struttura ma includendo aspetti relativi all'organizzazione e all'ambiente.

Considerazioni finali sul metodo delle interviste per il calcolo della complessità

Dall'analisi dei precedenti lavori dove si calcola la complessità per mezzo della somministrazione di questionari all'interno di aziende, emerge che questo metodo, pur essendo soggetto a critiche e molto discusso in un ambito strettamente tecnico quale quello ingegneristico, è comunque ampiamente diffuso e se utilizzato in modo corretto può dare luogo a risultati affidabili.

Pertanto, a fianco di una metodologia più rigorosa, si ritiene comunque che l'utilizzo di un questionario per il calcolo della complessità possa costituire un valido strumento di sperimentazione per una verifica dei risultati, anche ai fini del confronto con quelli ottenuti con altri metodi.

7.3 Metodo 3: complessità calcolata attraverso l'uso di un sistema esperto

Come già riportato nel capitolo 5 al fine di comprendere e definire la complessità è importante sostituire alla metodologia classica cartesiana una metodologia di tipo sistemico.

A differenza del *paradigma cartesiano*, secondo il quale il comportamento di un sistema può essere compreso studiando le proprietà delle sue singole componenti, il pensiero sistemico abbandona l'approccio analitico e riduzionista, per accogliere il principio contestuale ed *olistico*. Secondo tale impostazione non è possibile comprendere i sistemi per mezzo dell'analisi delle singole parti che li compongono; le proprietà delle parti, infatti, non sono proprietà intrinseche, ma possono essere comprese solo nel contesto dell'insieme più ampio di cui fanno parte. Il rapporto fra le parti ed il tutto è dunque rovesciato: nell'approccio sistemico le proprietà delle parti non spiegano il tutto, possono bensì essere comprese solo studiando l'organizzazione del tutto. Se analizzare significa smontare qualcosa per comprenderlo, nel pensiero sistemico analizzare qualcosa significa porlo nel contesto di un insieme più ampio. Il fenomeno osservato, assunto come realtà composta da un numero elevato di elementi e di relazioni tra questi, non potrà essere scomposto né semplificato, pena la perdita della sua caratteristica essenziale, la complessità.

L'abbandono dell'impianto cartesiano da parte del paradigma sistemico porta inoltre alla sostituzione del principio della causalità con quello *teleologico*: nella scienza classica la forma, il comportamento, lo sviluppo di un oggetto sono la conseguenza causale di eventi precedenti alle manifestazioni osservate, per cui si sottintende la pre-esistenza di un ordine conforme a realtà già conosciute oppure ad altre leggi ancora da identificare, ma che comunque esistono in natura e devono essere codificate. Il principio teleologico afferma al contrario che il comportamento dell'oggetto, dotato di propri mezzi e finalità, è al centro del processo conoscitivo, senza preoccuparsi di identificare a priori la legge che governa tale comportamento. Alla spiegazione causa-effetto si sostituisce l'interpretazione (o comprensione) comportamento-finalità.

Infine l'avvento del *paradigma sistemico* segna il passaggio dal principio di esaustività a quello della selettività o *aggregazione*. Si abbandona infatti il presupposto secondo cui bisogna enumerare tutte le parti di cui un oggetto si compone, osservarne tutte le variazioni, dal momento che una realtà complessa non potrà mai essere rappresentata oggettivamente in maniera completa: al contrario sarà necessario selezionare gli elementi che di questa realtà sono ritenuti pertinenti rispetto all'obiettivo conoscitivo. E' l'osservatore dunque ad operare questa selezione, secondo principi soggettivi.

PRINCIPI CARTESIANI	PRINCIPI SISTEMICI
RIDUZIONE: l'analisi del tutto si effettua attraverso l'analisi delle singole parti	OLISMO: l'oggetto va analizzato come un tutto immerso in una realtà più grande e va percepito insieme alle sue relazioni con l'ambiente
CASUALITA': la conoscenza parte da oggetti semplici e risale a oggetti complessi supponendo che esista un ordine logico pre-esistente	TELEOLOGIA: l'oggetto va considerato in base al suo comportamento, senza cercare leggi che spieghino a priori il suo comportamento, cogliendo il progetto di cui fa parte e lo scopo che l'osservatore gli attribuisce
ESAUSTIVITA': censimenti e rassegne complete sono necessarie per analizzare e conoscere l'oggetto	AGGREGATIVITA': occorre selezionare aggregati di componenti significativi per l'obiettivo conoscitivo dell'analisi, senza cercare di costruire un quadro complessivo dettagliato ed esaustivo degli elementi considerati

Tab. 7.3.1 principi cartesiani e sistemici a confronto

Le precedenti considerazioni sono valide in qualunque campo della ricerca, possiamo pertanto riferirle all'ambito più strettamente industriale di nostro interesse.

7.3.1 Il sistema ACT

E' su queste basi che negli anni '80 - '90 le metodologie per la valutazione della complessità tecnologica erano in genere basate su approcci di tipo sistemico e sullo sviluppo di sistemi esperti che coinvolgevano un numero molto elevato di fattori. Sulla base di queste considerazioni all'inizio degli anni '80 si sviluppano alcune metodologie per la misura della complessità tecnologica. Tra queste una delle più interessanti è il *sistema esperto ACT (Analyse de Complexité Technologique)*, attraverso il quale si riescono a definire:

- un *indice di complessità tecnologica* per ciascun prodotto
- una *scala di complessità tecnologica* sulla quale posizionare e ordinare i prodotti in base al loro indice.

- un certo numero di *livelli di complessità tecnologica* in cui dividere la scala di cui al punto precedente.

Nella figura seguente si rappresentano graficamente gli indici di tre prodotti industriali di evidente diversa complessità calcolati tramite l'ACT e riportati al fine di un confronto su una stessa scala.

L'ACT è stato sviluppato inizialmente nel **1982** dal **Prof. Franco Vidossich** [95] per conto di UNIDO, applicando al settore elettromeccanico e basato sulla definizione di matrici e di equazioni logico-numeriche che consentono il calcolo dell'indice I_C di complessità tecnologica di un prodotto elettromeccanico. Nella prima edizione informatizzata, l'indice veniva calcolato a partire da 103 fattori, ampliati poi a 128 nella seconda edizione del 1987/1988 a cura di UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) In seguito ai progressi del periodo nella tecnologia e considerazioni sempre più approfondite su tutti gli aspetti influenti sulla complessità i fattori vennero poi ulteriormente allargati a 145, consentendo il calcolo della complessità per la quasi totalità dei prodotti elettromeccanici allora esistenti.

Il Prof. Vidossich proseguì quindi nella messa a punto del modello arrivando ad individuare nel 1991 250 fattori raggruppabili nelle seguenti aree (l'elenco è stato tradotto da documenti originali in lingua portoghese):

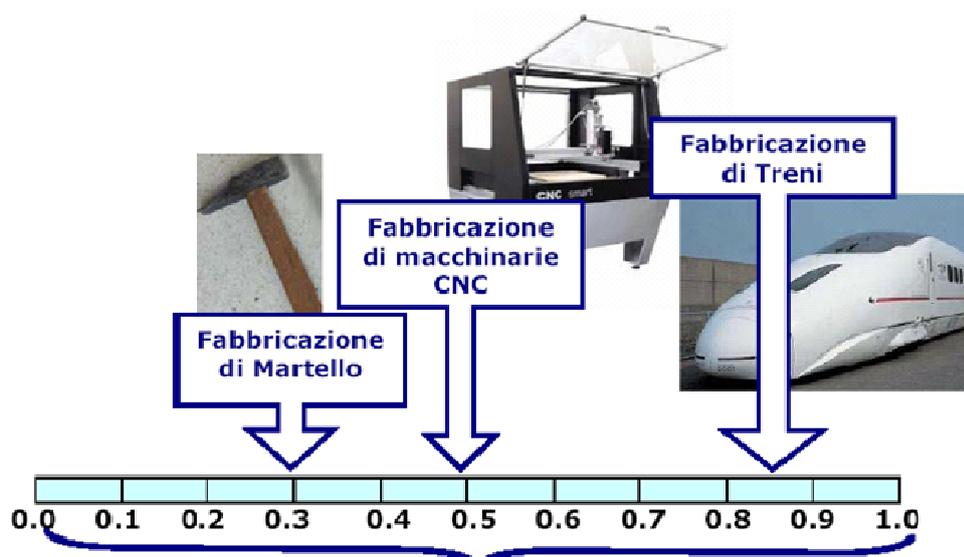


Fig.7.3.1 Questa scala permette differenziare i diversi **livelli** tecnologici requisito nella fabbricazione di ogni prodotto, e anche le diverse tipologie d'impresa la cui struttura consente di fabbricare prodotti i cui indici di complessità si trovano in quell'area o livello tecnologici.

Fattori interni:

1. Tecnologia: in declino, matura-stabile, evolutiva, emergente, di base, di differenziazione, di prodotto, di processo e di metodo, nuovi prodotti e processi in studio, combinazione di tecnologie già esistenti
2. Velocità di evoluzione: meno di 5 anni e maggiore di 35
3. Laboratorio: ricerca teorica, ricerca applicata, ricerca applicata per migliorare la qualità, per i prototipi, impianti pilota, per processi
4. Fattori globali: relazione dei prodotti con il tempo, relazioni con il medio ambiente, piano di azione per migliorare la produttività, ore di progetto dei prodotti, relazione tra la cultura dell'impresa e le sue mete
5. Burocrazia: corrente, acquisti, costo industriale, stocks, pianificazione, vendita, comunicazione, sistemi, formazione, progetti
6. Produzione: manuale, semiautomatizzata, totalmente automatizzata, mista, produzione flessibile, sistemi integrati di manifattura, trasporti interni automatici, nuovi processi previsti, nuove tecnologie, FMS
7. Assemblaggio: manuale, semiautomatico, automatico continuo/discontinuo, robotizzato, con controllo dell'imballaggio, FAS
8. Imballaggio: manuale, automatico, robotizzato con controllo di qualità, materiali speciali e processi speciali di imballaggio
9. Qualità: qualità corrente, qualità media, controllo qualità totale interno, fornitori, prodotti con norme di sicurezza speciali di fabbricazione, centro di gestione della qualità, focalizzazione sistemica di misure, qualimetria, misure automatiche nel corso della produzione, misure speciali con registrazione di dati, controllo di qualità dopo il montaggio manuale, controllo di qualità di materie prime, di semilavorati, di terzi
10. Aspetti speciali: fattori di appoggio alla strategia di impresa
11. Strategia di impresa: aumentare il valore aggiunto, diminuire il valore aggiunto, valore aggiunto stabile, aumento delle varietà dei prodotti finali, diminuzione delle varietà dei prodotti finali, mercato nazionale insufficiente, mercato internazionale, acquisto di tecnologia internazionale, differenziazione gamma di qualità del processo, accordi di cooperazione internazionale tra imprese, joint venture, riduzione del tempo di lancio, analisi di valore, marketing avanzato, vendite in nuovi mercati, prospettive.
12. Obiettivi zero: zero difetti, zero stocks, zero carte, zero fermate, zero incidenti, zero conflitti, zero mancanza di insicurezze, zero calorie, zero germi.

13. Gestione: risorse tecnologiche, prospettiva tecnologica, burocrazia, produzione, sistema di qualità, concetto di sviluppo dei sistemi informatici, definizione e/o modifica di strategie di impresa, marketing avanzato, ricambio dei gestori.

Fattori esterni:

- Tipologia del prodotto: beni di capitale, beni di consumo durevoli/non durevoli, funzione estetica del prodotto, funzione dinamica, funzione elettronica e informatica, funzione di biotecnologia, funzione chimica, funzione di telecomunicazione, funzione di trasporto, funzione materiale, funzione medio ambiente, funzione energia.
- Crediti specializzati:
 1. per piccole e medie imprese
 2. per progetti
 3. per mini-engineering: macchine e dispositivi per un valore complessivo inferiore ai 20-30 milioni di dollari americani
 4. per modernizzazione in generale
 5. per importazione di determinati beni di capitale
 6. per il finanziamento internazionale per l'importazione dei beni di capitale
 7. per il finanziamento per l'esportazione.
- Risorse umane: livello medio, universitario, specializzato (i seguenti fattori sono in particolare riferiti al Brasile, occorre adattarli in funzione del paese di interesse)
 1. operai varietà di qualifiche insufficiente
 2. operai livello delle qualifiche insufficiente
 3. operai recuperati
 4. quadri intermedi varietà di qualifiche insufficiente
 5. quadri intermedi livello delle qualifiche insufficiente
 6. quadri medi recuperati
 7. universitari varietà di qualifiche insufficiente
 8. universitari livello delle qualifiche insufficiente
 9. universitari recuperati
 10. nuovi corsi per operai
 11. nuove materie per i quadri medi
 12. nuove materie per gli universitari
 13. nuove scuole per gli operai

14. nuove scuole tecniche per i quadri medi
 15. convenzioni con scuole straniere per operai
 16. convenzioni con istituti di tecnologia stranieri quadri medi
 17. corsi e addestramento non esterno, università
 18. convenzioni con organizzazione dell'ONU
 19. convenzioni con paesi della CEE o della OCDE
 20. educazione interdisciplinare sistemica nelle università
- Norme nazionali e internazionali:
 1. nazionali riferite a oggetti
 2. nazionali, alimenti e salute
 3. nazionali, medio ambiente
 4. internazionali uso interno
 5. internazionali uso esportazione
 - Apporto tecnologico di terzisti
 1. materie prime metalliche
 2. materie prime plastiche, gomma e similari
 3. materie prime composite
 4. materie prime strategiche, titanio, acciai speciali di altissima resistenza, silicio ecc.
 5. materie prime ceramiche e simili
 6. materie prime di legno e composti di legno
 7. materie prime agricole e di origine animali
 8. materie prime radioattive
 9. materie prime chimiche
 10. materie prime strategiche e speciali
 11. semielaborati di pezzi e materiali metallici, non metallici, legno e composti di legno
 12. componenti meccanici, idraulici, pneumatici, di lubrificazione, elettrici, elettronici, per vapori, gas, di misura, speciali su commessa, aerospaziali

Esperti del settore attribuiscono ad ogni fattore un peso proporzionale alla maggiore o minore intensità con cui interviene sul prodotto stesso, che viene inserito in una struttura matriciale. L'indice di complessità del prodotto viene calcolato attraverso una analisi strutturale (vedi descrizione del metodo in seguito riportata) e come somma dei fattori ritenuti influenti, ciascuno valutato con il loro peso.

Il Prof. Vidossich crea presso l'Universidade Federal de Santa Catarina de Florianopolis, in Brasile, un gruppo di ricerca che lavora su queste tematiche approfondendo la metodologia alla base dell'ACT e pubblicando diversi lavori correlati [96,97]. Una terza edizione informatizzata dell'ACT viene quindi sviluppata da parte di due suoi collaboratori a cura dei **Prof. Neri dos Santos e J.E.E. Castro** Brasile nel **1993**. Rispetto alle edizioni precedenti, che si limitavano al calcolo della complessità di un prodotto elettromeccanico, presenta importanti novità: si determina un indice di complessità del binomio prodotto-impresa in cui vengono tenute in considerazione le risorse umane tecniche necessarie per la realizzazione del prodotto, fattori di grande importanza nell'ambito di azioni di trasferimento tecnologico, in particolare verso paesi in via di sviluppo.

In questa ultima versione del sistema vengono definiti 352 fattori per la determinazione della complessità così suddivisi:

- 9 globali dell'unità di produzione
- 5 società e medio ambiente
- 7 progetto
- 62 mezzi di produzione di cui 12 macchine per deformazione, 28 macchine per asportazione di truciolo, 22 altre macchine
- 37 supporto all'impresa in termini di lavorazioni per la produzione di semilavorati (16) e eseguite da terzisti (21)
- 25 componenti

per un totale di 145 fattori, già presenti nella seconda edizione, a cui si aggiungono:

- 18 funzioni tecniche relative al know-how del prodotto
- 17 funzioni tecniche di preparazione e appoggio alla produzione
- 62 funzioni tecniche relative all'uso di macchine e equipaggiamenti di produzione
- 37 funzioni tecniche esterne di infrastruttura o supporto alla produzione
- 8 funzioni tecniche diverse
- 8 funzioni tecniche del management

per un totale di 150 funzioni tecniche, a cui si aggiungono:

- 18 risorse umane referenti al prodotto
- 17 risorse umane referenti alla preparazione e appoggio alla produzione
- 62 risorse umane inserite nelle attività di produzione dell'impresa
- 37 terzisti
- 8 risorse umane adibite a funzioni tecniche diverse

- 8 risorse umane del management

per un totale di 150 fattori che vengono infine contratti in 57 fattori, in quanto lo stesso profilo professionale può coprire diverse funzioni.

L'indice di complessità viene quindi calcolato attraverso l'inserimento dei fattori in matrici e la definizione di equazioni logico-numeriche integrate in motori di inferenza che correlano i fattori dei tre raggruppamenti sopra definiti: fattori base, funzioni tecniche e risorse umane.

Nel **1996** una ricercatrice del gruppo di Vidossich, *Silvana Daccol* adatta il modello, concepito per il settore elettromeccanico, al settore delle costruzioni civili individuando nelle diverse aree fattori caratteristici di tale settore, in particolare al fine di creare uno strumento di diagnosi tecnologica applicabile alle piccole e micro imprese. Non si riporta per esteso l'elenco delle aree e dei relativi fattori in quanto non significativo ai fini della presente ricerca.

Nel **1998** il modello viene quindi nuovamente adattato allo scopo di fornire una metodologia di diagnosi tecnologica generica per imprese di piccole dimensioni di qualsiasi settore, necessitando però di alcuni leggeri adattamenti quando applicato ad un settore specifico.

A tale scopo le aree a cui afferiscono i fattori vengono ridefinite come segue.

Grandi aree:

A Controllo gestionale

1. Tecnologia di ufficio: gestione del personale, finanziaria, contabile amministrativa.
2. Acquisti: materie prime e altre risorse
3. Costo industriale: costo di produzione
4. Scorte: scorte di magazzino
5. Pianificazione/programma: pianificazione della produzione in relazione alla domanda
6. Vendite: vendite in funzione della domanda
7. Stampa di documenti: operazione di stampe dei documenti interni tramite gli strumenti informatici
8. Formazione e perfezionamento delle risorse umane in informatica e tecniche gestionali
9. Interconnessione con diverse aree: gestione imprenditoriale coerente con tutte le aree dell'azienda
10. Progetto CAD: utilizzo del CAD per la progettazione del prodotto
11. Progetto CAD/CAM: utilizzo del CAD/CAM per la progettazione del prodotto
12. Gestione della produzione: controllo e qualità della materie prime, mano d'opera, pianificazione della produzione, supervisione ecc.

13. Gestione del sistema di qualità: servizio post vendita, orientamento, rapidità della risposta, rispetto delle specifiche)

B Produzione

1. Produzione manuale: processo produttivo senza utilizzo di macchine, ma solo piccoli apparecchi e strumenti manuali
2. Produzione parzialmente automatica: utilizzo parziale di processi sviluppati tecnologicamente e processi manuali
3. Produzione totalmente automatica: il processo produttivo è automatizzato (alto livello di sviluppo tecnologico)
4. Produzione CNC (Controllo Numerico): il processo produttivo è accompagnato (controllo numerico della produzione)
5. Flessibilità di produzione: il processo produttivo permette che la produzione sia flessibile alle specifiche e preferenze del mercato.
6. Divisione della produzione in unità: Il processo produttivo permette che la produzione sia realizzata in una o più unità di produzione

C Montaggio

1. Montaggio manuale convenzionale: utilizza modelli tradizionali di montaggio senza innovazioni tecnologiche
2. Parzialmente automatico: utilizza modelli tradizionali e macchine
3. Automatico continuo: montaggio automatico in serie
4. Montaggio con controllo di qualità
5. Montaggio e imballaggio integrati
6. Rimontaggio non locale di utilizzo

D Imballaggio

1. Imballaggio manuale senza utilizzo di macchine
2. Imballaggio parzialmente automatico: parte manuale, parte con utilizzo di macchine
3. Imballaggio automatico continuo: imballaggio in serie con tecnologia moderna
4. Imballaggio con controllo di qualità: il processo di imballaggio passa per il controllo di qualità
5. Materiale di imballaggio speciale
6. Processi speciali di imballaggio: per materiali, equipaggiamenti, norme ecc.

E Risorse umane

1. Funzionari

2. Perfezionamento dei funzionari
3. Universitari specializzati
4. Perfezionamento degli universitari
5. Convenzioni con universitari
6. Convenzioni con istituti di ricerca, scuole tecniche, università e imprese private

F Strategia di impresa

1. Aumentare valore aggiunto
2. Applicazione di analisi del valore
3. Diversificare le varietà dei prodotti finali
4. Interesse nell'aprire filiali
5. Mercato dell'America Latina come linea strategica (il presente fattore é in particolare riferito al Brasile, occorre adattarlo in funzione del paese di interesse)
6. Acquisto di tecnologia internazionale
7. Situazione del mercato che permette di differenziare la gamma dei prodotti
8. Società nazionale e straniera tra imprese e università
9. Definizione di che cosa rivedere nella strategia di impresa
10. Realizzazione della pianificazione strategica
11. Gestione della burocrazia interna
12. Caratteristiche dell'imprenditore: corre rischi, è innovatore, possiede una visione del futuro ecc.
13. Valutazione dell'immagine dell'impresa di fronte ai clienti
14. Realizzazione di ricerca merceologica prima di lanciare il prodotto
15. Massa critica operativa: numero di funzionari in equipe

G Tecnologia

1. Tecnologia in declino
2. Tecnologia matura-stabile
3. Tecnologia evolutiva: la tecnologia ha spazio di crescita e miglioramento
4. Tecnologia emergente: la tecnologia sta incominciando ad essere utilizzata dalla impresa
5. Tecnologia di differenziazione del prodotto: tecnologie che aggiungono valore al prodotto
6. Tecnologia di differenziazione del processo e del metodo: tecniche, metodologie e conoscenze che aggiungono valore al prodotto
7. Utilizzo di nuove tecnologie e conoscenze previste a lungo termine: dimostra la strategia tecnologica e il futuro tecnologico dell'impresa

8. Combinazione di tecnologie già esistenti per nuove applicazioni: approfittare delle tecnologie già esistenti nella impresa per aumentare la produzione e creare nuove applicazioni tecnologiche
9. Nuova tecnologia per nuova applicazione: incorporare tecnologia inedita per applicazioni inedite
10. Stessa applicazione con modifiche dei materiali: approfittare della tecnologia esistente, modificando l'utilizzo di nuove risorse per ottenere incrementi
11. Pressione tecnologica senza trasferimento tecnologico: percezione da parte dell'impresa e del mercato di quanto sia necessario innovare e incrementare tecnologicamente in assenza di trasferimento tecnologico
12. Realizzazione di società o consulenze per lo sviluppo tecnologico attraverso Università e altre fonti di tecnologia

H Qualità

1. Norme di qualità che devono essere rispettate
2. TQC (Total Quality Control Interna): situazione che consente di raggiungere nella impresa livelli di soddisfazione di qualità interna
3. CWQC (Company Wide Quality Control) Interna + Fornitori: esistenza di controllo di qualità interno all'impresa che si estende ai fornitori
4. Controllo di qualità del lavoro commissionato a terzi: esistenza del controllo di qualità del lavoro di possibili servizi che la impresa commissiona a terzi
5. Produzione con norme di sicurezza speciali di fabbricazione: la produzione segue norme specifiche di sicurezza durante il processo produttivo
6. Focalizzazione sistemica di misura: la misura dei livelli di qualità visualizza la impresa nella sua totalità
7. Misura automatica nel corso della produzione con registrazione dei dati: tramite macchine e dispositivi integrati nella produzione
8. Controllo di qualità dopo il montaggio
9. Controllo di qualità secondo norme complesse o nuove
10. Controllo di qualità delle materie prime: controllo delle materie prime che vengono utilizzate in produzione
11. Controllo di qualità dei semilavorati/componenti: controllo dei prodotti intermedi che vengono utilizzate in produzione

12. Relazione del prodotto con il tempo (durabilità del prodotto): realizzazione da parte della impresa di alcune analisi di durabilità dei suoi prodotti
13. Relazione del prodotto con il medio ambiente
14. Qualità nella impresa in termini di aria, ergonomia, illuminazione, conforto: condizioni della impresa per il lavoro
15. Tempo utilizzato per migliorare la produttività
16. Tempo utilizzato per il progetto del prodotto
17. Armonia tra la cultura della impresa e le sue mete
18. Livello di difetti: ricerca dei livelli minimi dei difetti
19. Livello di stock: ricerca dei livelli minimi di stock
20. Livello di ritardo: ricerca dei livelli minimi di ritardo nella consegna dei prodotti
21. Livello di fermata: ricerca dei livelli minimi di fermata nella produzione
22. Clima: ricerca dei livelli minimi di conflitto tra i funzionari
23. Preoccupazione rispetto alla qualità di vita delle persone che vivono in funzione della impresa: esistenza da parte del proprietario di preoccupazione rispetto alla vita dei suoi funzionari espressa con misure/azioni concrete

I Gestione ambientale

1. Livello di carta: livello di accumulo di carta, riutilizzo, riciclaggio ecc.
2. Livello di incidenti: livello di incidenti con danno all'ambiente o all'uomo
3. Livello di consumo di energia: livello di economia di energia da parte della impresa
4. Livello di pulizia: pulizia dell'ambiente di lavoro
5. Livello di rifiuti: la impresa ha come meta la produzione di livelli minimi di rifiuti
6. Riciclaggio: sforzo nel riciclaggio dei residui
7. Trattamento di scarichi solidi, liquidi e gassosi: trattamenti che l'impresa realizza per non generare degrado ambientale.

Fattori esterni – Macroambiente (ambiente esterno all'impresa)

Grandi aree

A Caratterizzazione del prodotto nel mercato

- Beni di capitale finale: il prodotto è destinato alla produzione di altri beni macchine, equipaggiamenti ecc.
- Beni di consumo durevole: il prodotto è per il mercato dei consumatori e può avere una vita utile relativamente lunga: mobili, elettrodomestici ecc.

- Beni di consumo non durevole: il prodotto è per il mercato dei consumatori e può avere una vita utile relativamente corta: alimenti, indumenti ecc.
- Bene intermedio di capitale: il prodotto è un componente o semilavorato che passerà per altre tappe del processo produttivo. Destinato al mercato della produzione e con vita utile lunga: strumenti, dispositivi ecc.
- Beni intermedi di consumo: il prodotto è un materiale e passerà per altre tappe del processo produttivo. Destinato al mercato della produzione e con vita utile lunga: materiale di consumo utilizzato nella produzione di altri beni.

B Apporto tecnologico di terzisti:

- Materie prime: metalliche, ceramiche, legni, e compositi, agricole e di origine animale, plastiche e simili, radioattive, chimica e simili. La impresa cerca le migliori materie prime insieme a fornitori e fabbricanti
- Materiali diversi: ricerca costante da parte della impresa di materiali diversi utilizzati nel mercato dei fornitori (terzisti)
- Semi-lavorati: ricerca costante da parte della impresa di prodotti e componenti semi-lavorati utilizzati nel mercato dei fornitori (terzisti)
- Equipaggiamento ausiliare per la produzione: una impresa cerca insieme ai terzisti equipaggiamenti ausiliari : dispositivi di fissaggio dei macchinari, strumenti, stampi, matrici ecc.
- Componenti meccanici: la impresa si modernizza insieme a fornitori e fabbricanti
- Componenti pneumatici: la impresa si modernizza insieme a fornitori e fabbricanti
- Componenti di lubrificazione la impresa si modernizza insieme a fornitori e fabbricanti
- Componenti elettrici: la impresa si modernizza insieme a fornitori e fabbricanti
- Componenti elettronici: la impresa si modernizza insieme a fornitori e fabbricanti
- Componenti a vapore, gas ecc. la impresa si modernizza insieme a fornitori e fabbricanti
- Componenti di misura, sensori ecc.: la impresa si modernizza insieme a fornitori e fabbricanti
- Componenti e strumenti con e senza registrazione di dati: la impresa si modernizza insieme a fornitori e fabbricanti
- Componenti specifici per ramo di attività: la impresa si modernizza insieme a fornitori e fabbricanti

- Componenti speciali su commessa: la impresa si modernizza insieme a fornitori e fabbricanti
- Accordi con Istituti di ricerca al fine di ottenere apporto tecnologico.

C Norme

- Nazionali riferite a oggetti
- Nazionali riferite ad alimenti e salute
- Nazionali riferite all'ambiente
- Internazionali: rispetto all'ambiente interno all'impresa
- Internazionali riferite all'esportazione.

D Politiche di valorizzazione delle piccole e medie imprese: (i seguenti fattori sono in particolare riferiti al Brasile, occorre adattarli in funzione del paese di interesse)

- Procedure della Segreteria della Scienza, tecnologia e sviluppo, programma di incentivi finanziari alle piccole e medie imprese
- Modernizzazione dell'apparato burocratico
- Tendenza alla modernizzazione dei sindacati dei lavoratori e patronati
- Credito per le micro e piccole imprese
- Finanziamento per le esportazioni
- Politica per migliorare la burocrazia nel segmento delle piccole e medie imprese
- Appoggio istituzionale degli Enti parastatali in termini di gestione, addestramento, incentivo allo sviluppo delle piccole e medie imprese
- Politiche di incentivi fiscali statutarie e nazionali
- Relazioni tra imprese.

Il sistema esperto "ACT" misurando la complessità di un sistema consente molteplici applicazioni che vanno dalla valutazione della fabbricabilità di un prodotto alla pianificazione di trasferimenti tecnologici tra industrie di paesi diversi.

Come già sottolineato, questa metodologia è stata al momento soppiantata da altre (in particolare il metodo entropico) pur restando significativa ai fini della comprensione della tematica della complessità. Non si conoscono pertanto ulteriori studi o sviluppi del sistema ACT nell'ultimo decennio.

L'analisi strutturale che sta alla base dell'ACT è invece strettamente attuale per quanto riguarda le analisi prospettive sulla previsione dell'evoluzione nel tempo di un sistema e la determinazione delle variabili di maggiore influenza sul sistema. E' pertanto importante

approfondirla in quanto può risultare utile nella fase di progettazione e sviluppo di un prodotto, di un processo o di un sistema produttivo.

7.3.2 L'analisi strutturale

Un sistema può essere caratterizzato attraverso numerosi fattori che intervengono con maggiore o minore intensità.

Ogni fattore può interagire con gli altri secondo due modalità differenti:

- Influenza.
- Dipendenza.

Il sistema ACT si articola nelle seguenti fasi:

1. Censimento dei fattori (esperti)
2. Definizione dei legami tra i fattori (esperti)
3. Riempimento della matrice di incidenza
4. Elevamento a potenza
5. Identificazione dei fattori chiave
6. Calcolo dell'indice di complessità

Al fine di selezionare i fattori più influenti sul sistema viene costruita una matrice di incidenza, simile alle matrici di relazione introdotte nel capitolo 2 in merito alla sintesi di indicatori. Nella matrice di incidenza il fattore che viene inserito nella cella rappresenta l'influenza dell'elemento in riga su quello in colonna e viceversa quanto il fattore in colonna dipende da quello in riga, anziché una semplice relazione come nella matrice relazionale.

Tutti i fattori vengono definiti e misurati attraverso interviste strutturate della durata di 2 ore e mezza ciascuna con il responsabile dell'impresa, in base a quattro parametri di misura:

1. niente (N) 0%
2. poco (P) 1,00 – 29,9%
3. regolare (R) 30,00 – 59,9%
4. molto buono (MB) 60-100%

Attraverso una tecnica di benchmarking vengono quindi confrontati i risultati in termini di differenze e similitudini tra imprese dello stesso settore e di settori differenti al fine di definire il valore finale dei fattori.

La matrice di incidenza, che è quadrata di ordine pari al numero delle variabili considerate, viene riempita in base ai risultati delle interviste nei seguenti modi:

- per righe: ci si deve chiedere se la variabile riga influenza (1) o meno (0) la variabile colonna attuale.
- per colonne: ci si chiede se la variabile colonna è influenzata (1) o meno (0) dalla variabile riga.

In questo modo la diagonale principale risulta inevitabilmente nulla.

Le matrici di incidenza vengono utilizzate in particolare nell'analisi previsionale (matrici a impatto incrociato) dove l'accadimento dell'evento in riga influenza quello dell'evento in colonna, consentendo di ipotizzare scenari futuri in base alle probabilità che questi hanno di manifestarsi, calcolate sulla base di quanto già accaduto.

L'analisi del sistema e della interazione dei fattori può realizzarsi in due modalità:

- *Analisi diretta*: si sommano i fattori riga per riga e colonna per colonna ottenendo

$$k_i = \sum_{j=1}^n a_{i,j}$$

$$k_j = \sum_{i=1}^n a_{i,j}$$

dove k_i è il grado di influenza diretta del parametro riga in esame sul sistema cioè sui parametri colonna e k_j è il grado di dipendenza del parametro colonna dai restanti parametri.

Attraverso questo tipo di analisi viene posto in evidenza, tramite i valori assunti rispettivamente da k_i e k_j , il numero delle sole relazioni di influenza e dipendenza "dirette" esercitate da una variabile sulle altre, ovvero si identificano solo semplici relazioni del tipo: $A \rightarrow B$. Quando la gerarchia dei legami diventa molto articolata tale modalità diventa meno efficace in quanto, se ci si trova ad esempio in un caso del tipo $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$, non siamo in grado di stabilire, ad esempio, la relazione tra A ed E ($A \rightarrow E$).

Si consideri il seguente esempio: $A \leftrightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ che, in forma matriciale, diventa

	A	B	C	Sa
A	0	1	0	1
B	1	0	1	2
C	1	0	0	1
Sp	2	1	1	

L'importanza di ogni fattore all'interno del sistema in esame è identificato dalla somma dei valori di ogni riga e di ogni colonna. La somma dei valori su ogni riga viene anche chiamata "somma attiva" e identifica l'influenza di un singolo fattore sul sistema, ad esempio l'influenza del fattore B ($S_a = 2$) è maggiore sia dell'influenza di A ($S_a = 1$) che dell'influenza di C ($S_a = 1$). La somma dei valori su ogni colonna prende invece il nome di "somma passiva" e individua la dipendenza del fattore di competenza dai restanti.

I valori $a_{i,j}$ non devono per forza essere solamente 0 o 1, ma possono assumere qualunque entità in modo tale da sottolineare il grado di impatto o di dipendenza che compete ad ogni coppia di fattori (i, j).

In un prodotto industriale assemblato per esempio l'analisi diretta è quella che ci consente di comprendere l'interfaccia di due componenti direttamente a contatto.

La fase quattro del sistema ACT corrisponde all'analisi strutturale.

- *Analisi strutturale*: si effettuano elevamenti a potenza successivi della matrice di incidenza per poter valutare il numero di "percorsi di lunghezza n " esistenti tra due fattori i e j .

Si consideri l'esempio del caso precedente, la cui matrice di incidenza (ordine 1) è:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Tale matrice suggerisce che c'è un percorso di lunghezza 1 (influenza diretta) tra:

- A e B: ($A \rightarrow B$)
- B e A: ($B \rightarrow A$)
- B e C: ($B \rightarrow C$)
- C e A: ($C \rightarrow A$)

ovvero $A \leftrightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$.

Elevando al quadrato si ottiene:

$$M^2 = M \cdot M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ciò suggerisce che c'è un percorso di lunghezza 2 (influenza indiretta) tra:

- A e A: $(A \rightarrow B \rightarrow A)$
- A e C: $(A \rightarrow B \rightarrow C)$
- B e A: $(B \rightarrow C \rightarrow A)$
- B e B: $(B \rightarrow A \rightarrow B)$
- C e B: $(C \rightarrow A \rightarrow B)$

Elevando al cubo si ottiene:

$$M^3 = M^2 \cdot M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ciò suggerisce che c'è un percorso di lunghezza 3 (influenza indiretta) tra:

- A e A: $(A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A)$
- A e B: $(A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow B)$
- B e A: $(B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A)$
- B e B: $(B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow B)$
- B e C: $(B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C)$
- C e A: $(C \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A)$
- C e C: $(C \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C)$

Elevando alla quarta si ottiene:

$$M^4 = M^3 \cdot M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ciò suggerisce che c'è un percorso di lunghezza 4 (influenza indiretta) tra:

- A e A: $(A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A)$
- A e B: $(A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow B)$
- A e C: $(A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C)$
- B e B: $(B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow B)$
- B e C: $(B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C)$
- C e A: $(C \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A)$
- C e B: $(C \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow B)$

e che ci sono due percorsi di lunghezza 4 (influenza indiretta) tra:

- o B e A: $(B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A)$, $(B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow A)$

Seguendo questo procedimento si può continuare fino ad un ordine pari a 7, dopo il quale i risultati vengono falsati da instabilità numerica. L'algoritmo di calcolo dell'analisi strutturale, dovendo dare una stima della propagazione dell'influenza indiretta di un fattore sugli altri o su se stesso, prevede che i valori della matrice di incidenza siano solamente di tipo 0 o 1 (c'è influenza o non c'è influenza).

Alla luce di questo esempio si evince chiaramente che l'analisi strutturale, soprattutto in casi reali particolarmente articolati e con un elevato numero di fattori, consente di determinare in maniera meccanica un elevatissimo numero di percorsi caratterizzanti le relazioni indirette fino al VII ordine, cosa assolutamente non possibile con un calcolo puramente manuale.

La fase 4 dell'ACT corrisponde alla analisi strutturale.

Sono stati sviluppati software specifici che utilizzano questo metodo come il MICMAC Matrice d'Impacts Croisés Multiplication Classement, utilizzato per l'analisi previsionale.

Per fare un esempio, nella figura seguente è rappresentata una matrice di incidenza per un processo di fabbricazione di uno scafo in materiale composito dove vengono rappresentati tutti i fattori che incidono sul processo, per esempio la geometria dello stampo, il tipo di fibre di rinforzo ecc. ai quali sono stati assegnati dei valori sulla base dei criteri precedentemente esposti.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	...	
Progetto	geometria	1						3																				
	dimensioni	2							3																			
	spessori	3																			3							
	raccordi	4										3																
	sformi	5											3															
Stampo	materiale	6											2	3	3	3												
	geometria	7																			2		3					
	dimensioni	8																										
	raccordi	9																										
	sformi	10																										
	rugosità superficiale	11																										
	conducibilità termica	12																										
	resistenza termica	13																										
dilatazione termica	14								2																			
Rinforzo	tipo di fibre	15																									2	
	stile delle fibre	16																									3	
	grammatura dei tessuti	17																										
	orientamento delle fibre	18																										
	stratifica	19																										
	flessibilità dei tessuti	20																										
	spessore	21																										
	deformazione	22																										
	permeabilità	23																										
	compressibilità	24																										
rapporto di impregnazione dei tessuti	25																											
...	

Fig.7.3.2 Esempio di matrice di incidenza nel caso di un processo Resin Transfer Moulding for Infusion

Elaborando l'analisi diretta e strutturale dei fattori sopra riportati, si ottiene un elenco in ordine di importanza dei fattori stessi che, come si nota nelle due tabelle seguenti, è diverso a seconda della metodologia utilizzata.

N.	Influenza decrescente	Indice
1	Geometria di progetto	839
2	Pressione esterna	686
3	Temperatura della resina	646
4	Pressione di aspirazione	636
5	Composizione della resina	550
6	Velocità di reazione	461
7	Temperatura esterna	449
8	Temperatura dello stampo	449
9	Architettura delle fibre	379
10	Formulazione della resina	357

N.	Influenza decrescente	Indice
1	Geometria di progetto	839
2	Pressione esterna	686
3	Temperatura della resina	646
4	Pressione di aspirazione	636
5	Composizione della resina	550
6	Velocità di reazione	461
7	Temperatura esterna	449
8	Temperatura dello stampo	449
9	Architettura delle fibre	379
10	Formulazione della resina	357

Tab.7.3.3

Analisi diretta: indice di influenza: somma attiva Analisi indiretta MICMAC indice di influenza: somma dei fattori significativi pesati

Questo ci fa comprendere che il tipo di analisi svolta è fondamentale ai fini di comprendere il processo, il significato delle diverse variabili e per potere pertanto progettare nel modo migliore. Per questo, strumenti come il MICMAC e l'ACT possono essere utili al progettista che debba operare delle scelte in fase di progettazione sul prodotto che intende fabbricare o sul processo di fabbricazione.

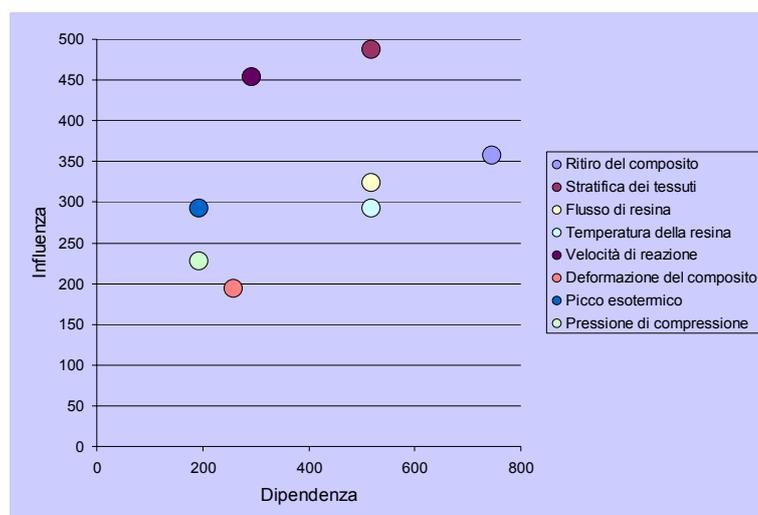


Fig.7.3.4 Piano di influenza e dipendenza dei fattori che caratterizzano il processo

Considerazioni sull'uso di sistemi esperti per determinare la complessità tecnologica

Pur trattandosi di un metodo che fornisce risultati efficaci, il sistema esperto è stato progressivamente abbandonato dopo gli anni '80 come strumento per il calcolo della complessità. L'analisi strutturale viene utilizzata in software quali il MICMAC come supporto alla presa di decisioni, ma per quanto riguarda la complessità l'attuale ricerca è indirizzata verso altri metodi, quali l'uso dei questionari o il modello entropico. Uno dei motivi del declino è certamente dovuto al numero molto elevato di fattori che devono essere raccolti e stimati in base all'opinione di esperti, comportando un notevole impegno di risorse e quindi tempi e costi significativi.

7.4 Metodo 4: complessità calcolata attraverso il modello entropico

La maggior parte dei ricercatori impegnati sull'argomento della complessità tecnologica concordano nell'utilizzare la funzione entropia in base al teorema dell'informazione di Shannon (vedi allegato H) per misurare la complessità. Riferita ad un contesto produttivo l'entropia fornisce lo stato del sistema manifatturiero, considerando tutte le risorse che lo costituiscono e la probabilità che ciascuna ha di trovarsi in una certa condizione.

Riprendendo le definizioni di complessità statica e dinamica, la misura entropica della *complessità statica* pertanto è da considerarsi un indicatore aggregato di elaborazione, processo e flessibilità relazionate al set di componenti che costituiscono il prodotto. In un sistema in funzione invece la misura entropica consente il calcolo di una *complessità dinamica*, quantitativamente definita come la quantità di informazione richiesta per monitorare lo stato del sistema al fine di gestirlo. La misura della complessità in termini di entropia è meno intuitiva di altri approcci, però in particolare nel contesto dinamico, è più semplice da applicare fin dalle prime fasi della progettazione del sistema, quando meno informazioni sono disponibili.

Una misura entropica della complessità può pertanto servire ad identificare le aree del sistema produttivo dove sono richiesti cambiamenti e controlli più stretti al fine di elevare le prestazioni del sistema. Può essere utilizzata come indicatore per determinare il punto di riconfigurazione del sistema, cioè in che modo il sistema deve essere modificato (ex. aumentare il numero di lavorazioni, di macchine ecc.) al fine di rispondere a nuovi requisiti della domanda. In questo senso può essere di supporto alla valutazione di introduzione di innovazione in un sistema produttivo e può inoltre servire per mettere a confronto il sistema con altri sistemi o con sé stesso in altri momenti storici.

A rigore anche la misura entropica della complessità presenta aspetti soggettivi, anche se meno evidenti di quelli del metodo di valutazione tramite questionari. Infatti, ci si riferisce alla quantità di informazione richiesta per descrivere lo stato del sistema all'interno di confini definiti da coloro che lo gestiscono e lo controllano, quindi gli stati del sistema sono individuati dai manager della produzione.

Il metodo entropico rappresenta comunque la metodologia di misura della complessità più diffusa e accettata in quanto non è connessa con il contenuto o il valore attribuito all'informazione ed è quindi adattabile e flessibile. Oltre alla produzione è infatti stata applicata a diversi ambiti disciplinari dalla Medicina, alle Scienze Sociali, alla Biologia.

Si riportano di seguito numerosi articoli significativi in merito, selezionati nella letteratura dagli anni '90 ad oggi a testimonianza di quanto affermato.

Nel **1989 Michael W.Golay, Poong H.Seong, Vincent P.Manno** [98] sono tra i primi ad introdurre il concetto di complessità e a misurarlo tramite l'entropia, partendo dalla teoria dell'informazione di Shannon. Il lavoro è finalizzato alla diagnosi dei guasti di un sistema e più in generale del suo stato, in cui la funzione entropica viene considerata come una misura della semplicità di diagnosi del sistema. L'entropia di informazione, secondo gli autori, quantifica l'incertezza del sistema, cioè la probabilità che il sistema si trovi in uno dei vari possibili stati.

Si consideri un sistema di componenti binari, ad esempio una linea di produzione dove ciascuna macchina CNC può essere inattiva o in funzione, un sistema composto da diverse macchine potrà attraversare un certo numero di stati $\langle n \rangle$ che per un sistema binario in cui lo stato di acceso o spento di ogni N-esimo componente sia equiprobabile sarà:

$$\langle n \rangle = 2^N$$

per un sistema binario con probabilità differente fra lo stato acceso o spento di ogni singolo componente allora l'entropia dell'informazione sarà data da:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i)$$

con:

$$H = - \sum_{i=1}^n h_i$$

e

$$h_i = -p_i \log_2(p_i)$$

in cui:

H = entropia di informazione

n = numero di stati del sistema

p_i = probabilità dello stato i-esimo

h_i = entropia dell'i-esimo stato

H cresce monotonamente al crescere di p e n ma non con il valore di N.

Nel caso in cui uno degli stati abbia probabilità 1 di occorrere, l'entropia di informazione è uguale a zero. Nel caso in cui tutti i possibili stati del sistema siano equiprobabili $H = N$, numero di componenti del sistema.

La funzione

$$h_i = -p_i \log_2(p_i)$$

è uguale a zero quando $p_i = 0$ o $p_i = 1$ ed ha un singolo massimo che si trova per $p_i = \frac{1}{n}$ anche se in pratica p_i non è facilmente valutabile. La difficoltà di diagnosi dipende quindi dal numero degli stati del sistema, per la migliore e più veloce diagnosi possibile è quindi necessaria la sequenza di interrogazioni più efficiente, ovvero quella con il minor numero di interrogazioni. Tale sequenza può essere trovata chiedendosi ad ogni passo della ricerca quale dei rimanenti stati ha maggiore probabilità di essere quello vero, quindi il numero medio di interrogazioni sarà:

$$\langle n \rangle = \sum_{i=1}^{n-1} i p_i$$

con $p_i > p_{i+1} > p_{i+2}$

Ovviamente per una sequenza random di interrogazioni il numero medio $\langle n \rangle$ sarà $(n-1)/2$. La probabilità di trovare lo stato reale del sistema con un limitato numero m di interrogazioni è data da:

$$P(m) = \sum_{i=1}^m p_i$$

e quindi la probabilità di fallimento della diagnosi è:

$$P_f(m) = 1 - P_m = 1 - \sum_{i=1}^m p_i$$

Si definisce allora entropia diagnostica la difficoltà di diagnosi di un sistema ad n stati:

$$H_D = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i)$$

Il numero medio delle interrogazioni necessarie ad una corretta diagnosi del sistema $\langle n \rangle$ è correlato con l'entropia diagnostica H_D .

Tale correlazione è data dalla funzione:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{2} 2^{H_D}$$

Gli autori correlano l'entropia di informazione di un sistema alla complessità del sistema attraverso le seguenti considerazioni:

1. i sistemi semplici sono facili da comprendere

2. la facilità di comprensione di un sistema può essere quantificata dal numero di domande che devono ricevere risposta al fine di ridurre a zero l'incertezza associata con lo stato del sistema
3. il numero di queste domande cresce monotonamente con l'incertezza del sistema
4. l'incertezza del sistema è direttamente proporzionale all'entropia di informazione del sistema
5. l'entropia di informazione di un sistema è la misura della complessità del sistema.

Il fatto che H non sia proporzionale ad N e le considerazioni sopra riportate portano alla conclusione che, eccetto che nella particolare condizione di equiprobabilità degli stati, il numero di componenti del sistema non è sufficiente per determinarne la complessità.

H è massima nel caso particolare di un sistema con stati equiprobabili con probabilità

$$p_i = p(1-p)^{(N-j)}$$

con j numero di componenti del sistema che si trovano in una configurazione indesiderata. In tal caso il numero di stati possibili è:

$$n = 2^N = \sum_{j=0}^N \frac{N!}{(N-j)!j!}$$

e la complessità statica (ovvero entropia di informazione) $H = N$.

Vengono individuati i seguenti aspetti come influenti sulla definizione di complessità:

- sono coinvolti molti elementi o componenti
- sono possibili molti tipi di relazioni o interconnessioni tra gli elementi
- esiste una componente di incertezza riguardante la reale condizione del soggetto.

Secondo gli autori la complessità del sistema è una proprietà del sistema stesso che dipende da fattori esterni quali la conoscenza del ricercatore. La difficoltà di diagnosi di un sistema può essere correlata alla sua complessità che ne esprime tutte le diverse possibili configurazioni.

Si conclude che è possibile definire 4 classi di complessità:

1. complessità computazionale relativa ad automatismi e algoritmi
2. complessità cognitiva relativa all'intervento umano nell'affrontare i problemi e risolverli
3. complessità di sistema relativa alle misure per classificare il sistema, la dinamica del sistema, e la diagnosi delle condizioni del sistema
4. prestazione umana relativa all'affidabilità e altri fattori umani.

Le ultime due categorie sono quelle più rilevanti nella definizione della complessità in termini di entropia, infatti la facilità di diagnosi del sistema e l'azione umana nei guasti del sistema sono i fattori che influenzano di più i cambi dell'entropia di informazione del sistema stesso.

Considerazioni sul metodo di Michael W. Golay, Poong H. Seong, Vincent P. Manno

Questo lavoro è significativo in quanto tra i primi ad utilizzare la entropia come misura della complessità di un sistema produttivo e a indicare che il solo numero di informazioni del sistema non è sufficiente a definirla pienamente.

Nel **1992** *Abhijit V. Deshmukh, Joseph J. Tavalage, Moshe M. Barash* [99] definiscono una complessità di mix di componenti basandosi su un modello di tipo entropico. Viene proposta un'analisi entropica del mix di prodotti e componenti da produrre all'interno di un'industria manifatturiera, definendo la complessità di mix produttivo come la difficoltà per un sistema di pianificare la produzione di un determinato numero di tipi di componenti di un prodotto.

I fattori che intervengono nella definizione di tale complessità sono:

1. in un singolo ciclo di produzione può essere prodotto più di un tipo di componente. Consideriamo appartenente ad una diversa tipologia ogni componente il cui processo di produzione differisce di almeno un'operazione dal processo di un altro componente.
2. ogni tipo di componente richiede operazioni multiple. Per operazione si intende ogni trasformazione richiedente lo stesso utensile per trasformare la materia prima in prodotto finito.
3. ogni operazione ha diverse possibilità di essere compiuta all'interno di una differente macchina o processo, dove per macchina si intende ogni equipaggiamento del sistema produttivo necessario a compiere un'operazione sul componente.

Si parte pertanto dal presupposto che la complessità di un sistema possa essere considerata come una funzione di due fattori principali:

- i) la struttura dei componenti che costituiscono sub-sistemi irriducibili
- ii) la maniera in cui i componenti sono connessi per formare il sistema.

La complessità di un mix di componenti può essere vista pertanto, in base a quanto sopra definito, come un risultato dei seguenti fattori:

1. più di un tipo di componente deve essere prodotto in una solo ciclo di produzione
2. ogni componente richiede molteplici operazioni per essere prodotto

3. ogni operazione, su un dato componente, ha molte opzioni macchina
4. il set di operazioni necessarie per produrre un dato tipo di componente può svolgersi in qualsiasi ordine oppure deve strettamente seguire specifici requisiti di precedenza.

Definiamo quindi $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$ un set di n componenti prodotti simultaneamente nel sistema manifatturiero, siano $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ le quantità prodotte per ogni parte, definiremo proporzioni di produzione:

$$\psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_n)$$

con

$$\psi_i = \frac{q_i}{\sum_{l=1}^n q_l}$$

allora sia

$$\phi_i = \begin{bmatrix} \phi_{11i} & \dots & \phi_{1ri} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{m1i} & \dots & \phi_{mri} \end{bmatrix}$$

la matrice dell'operazione i -esima con $1 < i < m$ sulla macchina k -esima con $1 < k < r$ in cui $\phi_{ikl} = 1$ se l'operazione i sulla macchina k per il pezzo $P_l \in P$ in alternativa $\phi_{ikl} = 0$.

Quindi riferendoci ai tempi alle precedenze, e alle durate in cui effettuare l'operazione definiremo $\Pi = \langle \pi_{ijkt}, \forall i \in (1, m), \forall j \in (1, r), \forall k \in (1, r), \forall l \in (1, n) \rangle$ i tempi di operazione richiesta per la parte P_l sulla macchina k per l'operazione j .

Ovvero sarà $\pi_{ijkt} = \pi_{ttkt}$ se esiste e $\pi_{ijkt} = 0$ una precedenza fra j ed i . Altrimenti varrà semplicemente $\pi_{ijkt} = \pi_{ttkt}$.

La matrice pertanto rappresenta i requisiti del tempo di lavorazione per un determinato componente e anche le relazioni di precedenza tra le operazioni. La dimensione di questa matrice è definita dal numero di componenti, macchine e operazioni associate a un certo mix di prodotti.

E' ovvio che se $\phi_{ikl} = 0$ allora $\pi_{ijkt} = 0 \forall j \in (1, m)$

$$\text{Inoltre } \Delta_{ijkl} = \min(1, \pi_{ijkt}) \text{ e } \hat{\pi}_{ijkt} = \pi_{ijkt} \psi_l \sum_{l=1}^n \Delta_{ijkl}$$

Quindi si definisce:

$$\hat{\pi}_{ijkt} = \frac{\hat{\pi}_{ijkt}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^n \hat{\pi}_{ijkt}}$$

$$\text{e } \hat{\Pi} = \langle \hat{\pi}_{ijkl}, \forall i \in (1, m), \forall j \in (1, r), \forall k \in (1, r), \forall l \in (1, n) \rangle$$

L'obiettivo della misura di complessità che gli autori propongono è quello di misurare l'ammontare delle interazioni impiegate nel produrre un gruppo di componenti, e quindi quantificare anche la difficoltà nel prendere decisioni durante la produzione.

Una tale quantità per un mix di componenti $H_P = f(\tilde{\Pi})$ e rispetta i seguenti assiomi:

1. H_P è continua in $\tilde{\Pi}$
2. Se $P' \subseteq P$ allora $H_{P'} \leq H_P$
3. esiste una serie non vuota di mix di componenti S , tale che se $P \in S$ allora $H_P = 0$
4. se tutti gli elementi di $\tilde{\Pi}$ sono uguali allora H_P è una funzione monotona crescente del numero di componenti l di P , del numero di macchine k associate al processo e del numero totale di operazioni associate m
5. la misura della complessità H_P aumenta con l'aumentare della flessibilità di produzione, ovvero con la riduzione delle precedenze
6. se tutti i tempi di operazione sono uguali per ogni componente di P allora H_P aumenta all'eguagliarsi di ψ ovvero la complessità (anche decisionale) aumenta all'eguagliarsi delle proporzioni di produzione dei componenti
7. H_P aumenta, così come la suddivisione delle risorse, all'aumentare dei componenti P . Ovvero la complessità aumenta all'aumentare del numero di componenti che necessitano della stessa macchina per la lavorazione.
8. il valore di H_P non aumenta se vengono aggiunte una macchina o un'operazione che non vengono utilizzate da nessun componente
9. se il mix di componenti P viene suddiviso in due o più gruppi allora la complessità del processo dovrebbe rimanere costante considerando che $P = P' \cup P''$ allora $H_{P' \cup P''} = H(\delta_1, \delta_2) + \delta_1 H_{P'} + \delta_2 H_{P''}$, dove δ_1, δ_2 sono la sommatoria delle matrici $\tilde{\Pi}$ per P' e P'' .

La complessità della parte P del mix di componenti si definisce quindi in base al teorema di Shannon (vedi allegato H):

$$H_P = -C \sum_{(i=1)}^m \sum_{(j=1)}^m \sum_{(k=1)}^r \sum_{(l=1)}^n \tilde{\pi}_{i/jkl} \log \tilde{\pi}_{i/jkl}$$

in cui:

C è una costante positiva che corrisponde alla unità di misura e viene considerata = 1

il log è in base 2 (vedi allegato H)

l'unità di misura di H_p è il bit

n sono le parti che devono essere prodotte simultaneamente dal sistema

m è il numero totale di operazioni associate con il mix di parti

r è il numero totale di macchine associate con la produzione del mix di parti

$\hat{\pi}_{ijki}$ sono i requisiti normalizzati di processo già definiti in precedenza come:

$$\hat{\pi}_{ijki} = \frac{\hat{\pi}_{ijki}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^n \hat{\pi}_{ijkl}}$$

in cui:

$$\hat{\pi}_{ijki} = \pi_{ijki} \psi_l \hat{A}_{ijki}$$

con:

π_{ijki} è il tempo di lavorazione per l'operazione i sulla macchina k della parte P_l

ψ_l è il rapporto di produzione del componente l sul totale di componenti prodotti per ogni corsa di produzione

e

$$\hat{A}_{ijki} = \sum_{l=1}^n A_{ijki}$$

rappresenta il numero di volte che una particolare sequenza di operazioni $i \longrightarrow j$ sulla macchina k è richiesta su tutte le parti, è quindi una misura di interazione tra le parti

in cui $A_{ijki} = \min(1, \pi_{ijki})$

e la matrice già precedentemente introdotta:

$$\hat{\Pi} = (\hat{\pi}_{ijkl}, \forall i \in (1,m), \forall j \in (1,r), \forall k \in (1,r), \forall l \in (1,n))$$

relativa ai tempi di operazione richiesta per la parte P_l sulla macchina k per l'operazione j .

La misura dell'entropia usata per definire la complessità ha proprietà interessanti, che possono essere utilizzate dal progettista/pianificatore del sistema per prendere decisioni circa la selezione dei mix di parti.

La somiglianza e dissomiglianza nelle parti è relazionata con i requisiti del processo e quindi con $\hat{\pi}_{ijkl}$ Valgono i seguenti *teoremi*:

1. la complessità statica del processare una parte di un mix è minima quando la somiglianza tra le parti è minima o la dissomiglianza è massima.
2. la complessità statica associata con un sistema è massima quando la somiglianza tra le parti è massima o la dissomiglianza è minima.
3. le dimensioni indipendenti che può assumere l'insieme di valori di $\vec{m}_{i,j}$ hanno una influenza sulla complessità H_p

I primi due punti suggeriscono che, a parità di dimensioni, un sistema in cui il raggruppamento di parti è basato sulla somiglianza di processo ha una maggiore complessità statica di quelli in cui i raggruppamenti sono basati su altri criteri. Intuitivamente si può fare un confronto con il processo di presa di decisioni: se le diverse alternative sono tutte molto simili, scegliere quella giusta è più difficile.

Il terzo punto suggerisce che l'aumento del numero delle parti in un sistema, o numero di operazioni, o numero di macchine, ha un effetto minore sul sistema quando il sistema ha dimensioni più piccole. Per esempio l'aggiungere una macchina a un grande sistema manifatturiero incrementa la complessità del sistema di più che se fosse stato fatto in una piccola officina.

La misura della complessità pertanto fornisce indicazioni utili non solo al progettista del prodotto ma anche a colui che deve decidere il layout dell'impianto produttivo.

Considerazioni sul metodo di Deshmukh, Tavalage, Barash

Quello di Deshmuk è un nome importante nelle ricerche sulla complessità tecnologica a cui si devono diversi significativi lavori. I dati utilizzati e le variabili citate sono rilevabili direttamente in un sistema manifatturiero in forma automatizzata e, a differenza del lavoro sulla difficoltà di diagnosi di Golay [98], la complessità del mix di produzione tiene conto non solo degli elementi del sistema come il numero di macchine, e del processo come il numero di operazioni, ma anche dell'interdipendenza fra le operazioni. In questo caso l'entropia del mix di produzione risulta essere un ottimo indicatore della complessità di processo o di sistema, relativo però alla mera produzione delle parti del prodotto, trascurando aspetti che possono essere essenziali nel prendere decisioni all'interno dell'azienda quali la complessità di prodotto relativa al progetto o all'assemblaggio. In questo lavoro inoltre gli autori non trattano aspetti importanti quali eventuali regole di produzione (non necessariamente interdipendenze operazionali) che possono

diminuire la complessità di processo senza diminuire la flessibilità (e soprattutto il numero di parti prodotte) del sistema.

Un aspetto significativo del lavoro è costituito dal considerare al posto delle probabilità di stato del sistema, difficili da individuare, i tempi normalizzati di processo ricavabili più semplicemente dagli archivi di programmazione dell'impianto.

Nel 1995 *G.Frizelle, E Woodcock* [100] propongono una definizione di complessità di processo basata sulla funzione entropica sempre a partire dalla teoria dell'informazione di Shannon (vedi allegato H).

Consideriamo un sistema S che può assumere N stati esclusivi $s(i)$, risulterà che il numero di osservazioni necessarie per N-1 variabili con una accuratezza ϵ con probabilità α sarà:

$$\eta_{min} = \frac{N-1}{4\epsilon^2(1-\alpha)}$$

in base a ciò la complessità di un sistema sarà sempre $\eta \geq \eta_{min}$. La funzione di complessità ϕ potrà quindi essere definita come:

$\phi(S)=0$ se $N=1$ oppure $\phi(S)>0$ se $N>1$ e anche

$$\phi(\{S^1, \dots, S^M\}) = \sum_{m=1}^M M(S^m)$$

dove gli S^m sono gli m-esimi sottosistemi in cui è suddivisibile S.

In tal modo η_{min} diventa per M sottosistemi:

$$\eta_{min} \leq \frac{\prod_M N_j - 1}{4\epsilon_{min}^2(1-\alpha)}$$

dove N_j è il numero di stati nel j-esimo sottosistema. Per rendere la precedente relazione un'uguaglianza occorre analizzare il comportamento del sistema.

Descrizione del processo di osservazione: il sistema viene osservato ad intervalli regolari, considerandone gli stati stazionari ed ergodici, se lo stato i-esimo è stato osservato $m(i)$ volte a intervalli δ_t una stima del tempo totale di occupazione è data da $[m(i)-1] \times \delta_t$ o più semplicemente $n\delta_t$. Quindi un'osservazione del sistema è rappresentata da una n-tupla $\{n(i) \delta_t \dots n(j) \delta_t\}$ dove n sono le osservazioni su un sistema che può assumere N stati $n(i), n(j) \in \boxed{x}$.

Questa sequenza può occorrere C volte dove C è dato dal coefficiente multinomiale:

$$C = \frac{n!}{n(1)! \dots n(N)!}$$

usando l'approssimazione di Stirling

$$C \simeq \frac{(2\pi n)^{\frac{1}{2}}}{(2\pi n)^{\frac{n}{2}} \prod_{N} n(i)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{n(i)}{n} \right]^{n(i)}}$$

per grandi valori di n.

Per attribuire la proprietà additiva richiesta per la misura e usando la legge dei grandi numeri:

$$\frac{\log C}{n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} - \sum_N p(i) \log_2 p(i) = \phi(S)$$

dove $\phi(s)$ è l'entropia dello stato considerato. Si assume la base 2 per via dell'attinenza alla teoria della comunicazione di Shannon e per riferirsi al caso di una macchina che può essere in funzione o meno. I vari stati non sono indipendenti l'uno dall'altro, ciò significa che lo stato $s(i)$ può essere collegato ad un numero r di stati precedenti, e che questa sequenza di stati può essere caratterizzata dalla memoria r . Per lo più, tramite una migliore scelta dello spazio di probabilità, le sequenze assumono la proprietà Markoviana (vedi allegato G), ovvero che ogni stato dipende dal suo predecessore, quindi esistono solo 2 categorie di stati, quelle con $r = 1$ (Markoviane) che vengono definiti stati programmabili e quelle con $r = 0$ che vengono definiti stati non programmabili (equivalenti ad eventi casuali come il lancio di un dado). Definiamo con il termine traiettoria una sequenza di stati aventi $r = 1$.

Riferendoci ad un sistema manifatturiero che può virtualmente assumere infiniti stati, il cui livello di capacità produttiva è μ_{ma} che attualmente produce ad un livello $v < \mu$, e che quindi per la proprietà ergodica avrà una probabilità di essere in funzione $\left[\frac{v}{\mu} \right]$ avremo una probabilità che il sistema assuma lo stato i -esimo espressa come:

$$p(i) = \left(1 - \frac{v}{\mu} \right) \left(\frac{v}{\mu} \right)^i$$

con un'entropia

$$H(S^\infty) = - \left[\frac{1}{(1-v)} \left\{ (\mu - v) \log_2 \left(1 - \frac{v}{\mu} \right) + v \log_2 \left(\frac{v}{\mu} \right) \right\} \right]$$

Quest'ultima è l'entropia di un sistema manifatturiero che può assumere infiniti stati in cui non sono considerate le code, si noti come l'entropia è crescente al raggiungimento del punto di

saturazione della capacità produttiva. Una versione analitica della precedente formulazione dell'entropia che tenga conto della teoria delle code può essere:

$$H(S^{oc}) = H(S^T) + H(S^{NT})$$

dove i suffissi T e NT stanno per tollerata e non tollerata, la prima sarà uguale alla precedente formulazione dell'entropia, per entropia non tollerata si intende il surplus entropico derivante dal fatto che il sistema è fuori controllo e quindi sta agendo oltre i limiti di tolleranza. Indicando con P la probabilità che il sistema non sia sotto controllo statistico, separando stati programmabili da stati non programmabili, si può riscrivere la precedente formula così:

$$H(S^{oc}) = - \left\{ P \log_2 P + (1 - P) \log_2 (1 - P) + (1 - P) \left[\sum_{M^a} \sum_{N_j^a} p_{ij}^a \log_2 p_{ij}^a + \sum_{M^a} \sum_{N_j^b} p_{ij}^m \log_2 p_{ij}^m + \sum_{M^m} \sum_{N_j^b} p_{ij}^b \log_2 p_{ij}^b \right] \right\}$$

dove p^a sono le probabilità di code con lunghezza variabile (> 1), p^m sono le probabilità di non avere code e p^b sono le probabilità di avere stati non programmabili (bernulliani) per ogni j-esima delle M risorse avremo quindi $N_j = N_j^a + N_j^m + N_j^b$ stati.

Questa formulazione dell'entropia è definita *dinamica* poiché tiene conto dei tempi di osservazione e di funzionamento del sistema, dove il termine "dinamica" si riferisce al sistema nel suo complesso più che ai singoli stati dato che sono considerati stazionari.

Ponendo $P = 0$ la precedente formula diviene semplicemente:

$$H = \sum_M \sum_{N_j} p_{ij} \log_2 p_{ij}$$

che è la complessità *statica*, dato che si riferisce alla struttura del sistema senza tenere in considerazione se stia operando sotto controllo statistico o meno.

Interpretazione del modello di Frizelle - Woodcock:

Consideriamo che ciascun processo produttivo sia semplicemente una operazione su una risorsa. Quindi le risorse possono sia lavorare che non lavorare e ci sono 2 stati, attivo e disattivo. L'entropia di un sistema finito ha il suo valore massimo quando tutti gli eventi sono equiprobabili. In questo caso la probabilità p associata ad ogni evento è $\frac{1}{2}$, quindi ogni risorsa corrisponde ad un valore 1 e la complessità statica è uguale a M, cioè al numero di risorse. Questo è uno dei motivi

per cui si è scelto il 2 come base del logaritmo. In questo senso la misura della complessità può essere pensata come un calcolo del numero di risorse assegnando a ciascuna un peso di $\sum p \log_2 p$. Infatti su N stati ci sarà sempre uno stato inattivo e quindi N-1 operazioni, per cui il fattore di peso si riduce a $\log N$.

Il peso può essere visto come una misura dell'ostacolo al flusso produttivo rappresentato dalla presenza di macchine e relative operazioni. Se non ci sono operazioni la risorsa (processo) è inattiva, non c'è resistenza al flusso e il peso è zero. Quando c'è una operazione, allora c'è un prodotto coinvolto e la resistenza al flusso è 1, cioè la presenza del prodotto impedisce il flusso. Quando ci sono due operazioni, allora la resistenza al flusso è 1.58, che rappresenta l'effetto di blocco del primo prodotto più l'effetto di blocco aggiuntivo del secondo. Quindi aggiungere un nuovo prodotto ha un impatto aggiuntivo decrescente, cioè se abbiamo 1000 prodotti aggiungerne un altro avrà un effetto ridotto sull'impedimento complessivo al flusso. Il peso quindi ha a che fare con la nozione di resistenza al flusso causata dalle altre operazioni presenti sulla risorsa. La misura conta il numero di processi di prodotto, e dato che il peso fornisce l'effetto incrementale di aggiungere più prodotti per processo, l'unità di misura che viene utilizzata è l'"*equivalent product process*" (*epp*).

La complessità ha quindi l'effetto di impedire il flusso, di aumentare i tempi di produzione e rendere le operazioni meno praticabili. Pertanto diventa uno scopo strategico della gestione di un impianto produttivo ridurre la complessità. L'aumento della probabilità P riduce il valore complessivo di H, pertanto occorre evitare gli stati non programmati e controllare i processi produttivi al livello massimo possibile.

A seconda di come vengono rilevati i dati dal sistema produttivo, si misura una:

- *complessità statica*, definita a partire dal database aziendale, bolle dei materiali, cicli di lavoro, centri di lavoro lungo il corso dell'anno che consentono di determinare i carichi di lavoro
- *complessità dinamica*: definita a partire da osservazioni sul sistema condotte a intervalli di tempo regolari nel periodo definito: code e stati sulla risorsa, lavorazione, inattività.

Esempio:

Sistema convenzionale, sezione di una linea di produzione: 5 processi, 19 macchine o stazioni di lavoro, 352 componenti:

$$H_{\text{statico}} = 95$$

$$H_{\text{dinamica}} = 115$$

Sistema CN 35 processi, 59 macchine o stazioni di lavoro, 350 componenti:

$$H_{\text{statico}} = 96.4$$

$$H_{\text{dinamica}} = 160$$

Sistema misto fabbricazione e assemblaggio, 74 macchine o centri di lavoro che coinvolgono 57 processi e 126 parti attive, controllo tramite la tecnica del kanban:

$$H_{\text{statico}} = 75$$

$$H_{\text{dinamica}} = 145$$

La complessità dinamica risulta pertanto in genere più alta di quella statica. Il sistema misto ha la complessità statica più bassa ma la dinamica assume un valore intermedio in quanto la tecnica del Kanban ha il noto svantaggio di creare anziché diminuire il “work in progress”, inoltre risulta scarsa la sincronizzazione tra l’area di lavorazione e quella di assemblaggio.

La misura entropica della complessità consente di confrontare quantità che prima non potevano essere confrontate. Obiettivo del management della produzione deve essere quello di ridurre il più possibile la complessità attraverso scelte ottimali dei layout, processi e tecniche di produzione.

Considerazioni sul metodo di Frizelle -Woodcock

Frizelle è uno dei maggiori studiosi di complessità degli anni '90. Sebbene la trattazione di Frizelle-Woodcock sia forse la più semplice fra le metodologie di un certo rigore matematico fino ad allora considerate, risulta di difficile applicazione per i manager dei sistemi di produzione. Pur infatti prendendo in considerazione solamente dati ricavabili dalle programmazioni della produzione effettuate nel tempo trascorso, il modello risulta di difficile interpretazione. La complessità entropica di sistema proposta può essere considerata come un conteggio delle risorse disponibili pesato con un peso di $\sum p \log_2 p$ dove, come già detto, è considerata una base 2 per via del fatto che la risorsa in questione sia in funzione o meno. Tale peso sarà massimo per una probabilità di 1/2, e potremmo interpretarlo come l'ostacolo al flusso di prodotto (o parte di esso) dovuto alla produzione di più prodotti contemporaneamente e a come si incrociano i processi produttivi delle varie parti. Riguardo alla complessità dinamica l'aumento di quest'ultima porta alla produzione di ritardi nei tempi di consegna e rende le operazioni meno praticabili. Commentando la formulazione data, vediamo come la divisione fra stati controllabili e non controllabili sia talvolta molto sottile, ad esempio il sistema funziona correttamente se sta producendo un pezzo inutile ma l'effetto di questo è un aumento di complessità a scapito della

produzione di oggetti utili, un altro esempio è dato dall'aumento delle code ad un livello tale da non poter essere smaltite oltre il normale ciclo lavorativo. Il carattere ricorsivo della formula la rende utilizzabile su più sottosistemi (elemento comune ad altre trattazioni) e ne permette l'utilizzo anche in un contesto gerarchico di produzione, allargando virtualmente le possibilità pratiche della stima entropica al di là del mero sistema produttivo. Il termine P inoltre è un ottimo indicatore del livello di burocratizzazione del sistema, aumentandolo si nota come aumenti il livello di entropia, in altre parole un aumento della burocrazia deve essere controllato per evitare di aumentare in modo eccessivo la complessità. L'utilizzo di un simile indicatore in un contesto aziendale, ovvero la diminuzione dell'entropia come obiettivo strategico, si addice bene a metodi di gestione quali il Just in Time, basti pensare alla suddivisione degli stati in programmabili e non programmabili.

Nel 1998 *Abhijit V.Deshmukh, Joseph J.Tavalage, Moshe M. Barash* [101] riprendono quanto definito nel precedente articolo del 1992 [99], specificando meglio alcuni termini e idee e completando quanto precedentemente espresso con una valutazione della prestazione del sistema in funzione della politica di controllo e della complessità statica.

La misura della *complessità strutturale statica* deve soddisfare le seguenti condizioni:

1. La complessità statica deve aumentare con il numero di parti, numero di macchine, e operazioni richieste per processare il mix di componenti
2. La complessità statica deve aumentare all'aumento della flessibilità della sequenza per le parti nel lotto di produzione
3. La complessità statica deve aumentare come condivisione delle risorse all'aumentare delle parti
4. Se il mix originale di parti viene diviso in due o più gruppi la complessità della lavorazione resta costante.

Viene ripresa la misura della *complessità della parte P del mix di componenti* in base al *teorema di Shannon già fornita nel precedente articolo*.

Teorema 1:

Si definisce complessità statica per un mix di prodotti P:

$$H_P = -C \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^n \tilde{n}_{ijkl} \log \tilde{n}_{ijkl}$$

in cui

$t_{i,k}$ rappresenta il tempo di processamento per l'operazione i sulla macchina k per la parte P_i

La misura entropica della complessità statica è un indicatore aggregato di elaborazione, processo, e flessibilità di prodotto relazionate a un set di parti. L'elaborazione, il processo, e la flessibilità di prodotto sono funzioni del numero di opzioni disponibile per le parti.

La complessità statica misura il numero totale di decisioni che sono relazionate a un mix di prodotti e quindi, può essere considerato un indicatore di flessibilità.

La complessità statica massima associata a un sistema capace di svolgere una operazione singola su una sola macchina è zero, la complessità statica massima associata a una linea di trasferimento costituita da r macchine, ciascuna che esegue esattamente una lavorazione è $\log r$, la complessità statica massima associata a una commessa, con r macchine capaci di svolgere m operazioni su n parti, senza nessuna modalità di lavoro flessibile è $\log m^2 n$, e la complessità massima statica associata con un FMS (Factory Manufacturing System) capace di maneggiare n parti che hanno un massimo di m operazioni, ciascuna su r macchine, con modalità di lavoro flessibili, è $\log m^2 r n$.

Quindi $H_{P \text{ linea di trasferimento}} \leq H_{P \text{ commessa}} \leq H_{P \text{ FMS}}$

Vengono ridefinite due proprietà relative alla matrice \tilde{H}

1. Le dimensioni indipendenti di \tilde{H} hanno una influenza sub-sinergica su H_P
2. Gli elementi della matrice \tilde{H} hanno una influenza sub-sinergica su H_P

Il punto 1, come già espresso nel primo articolo, implica che l'aumento del numero di parti, operazioni, o macchine abbia un effetto più ridotto sulla complessità del sistema quando il sistema ha una dimensione più piccola.

Riguardo alla proprietà 2, gli elementi individuali della matrice \tilde{H} cambiano per varie ragioni, come i cambiamenti nel progetto di prodotto, i cambiamenti nel materiale grezzo, o i miglioramenti nei processi. La variazione nei requisiti operazionali avrà un effetto massimo quando il sistema ha meno complessità statica rispetto a quando opera alla massima complessità.

La parte propriamente nuova rispetto all'articolo del 1992 è quella in cui viene definita la correlazione tra complessità statica e prestazione del sistema.

La prestazione di un sistema dipende non solo dal tipo di parti e dalle risorse, ma anche dalla politica di controllo usata. Una politica di controllo C è definita come una sequenza di regole di decisione che descrive le azioni intraprese ad ogni istante di decisione.

$C = (C_0, C_1, \dots)$

in cui C_t è un vettore delle distribuzioni delle probabilità sulle azioni disponibili per ciascun stato all'istante t .

Si definiscono:

C^P la politica di controllo ottimale per il dato mix di parti

W_{CP} il tempo medio di attesa per il mix di parti P operante sotto la politica di controllo ottimale C^P

C è considerata stazionaria se $C_i = C_j, \forall i, j$ e le regole decisionali non dipendono dalle decisioni prese o dagli stati passati. Una politica decisionale stazionaria è detta deterministica se è scelta solo un'azione per ogni stato. Un altro importante punto da considerare è la variabile tempo, ogni misura della performance di un'impresa manifatturiera deve prendere in considerazione quest'aspetto. Fin quando la misura di complessità non comprenderà in modo esplicito queste due caratteristiche, si assume un comportamento ergodico (ovvero la probabilità di uno stato uguale al tempo di permanenza del sistema nel periodo considerato), una strategia fissata e una costante intensità di traffico. Consideriamo quindi che il sistema composto da r macchine che compiono m operazioni su un mix produttivo P di n componenti con un vettore delle proporzioni, stia operando basandosi sulla politica di controllo ottimale C_P supponendo che una tale politica sia stata trovata per il suddetto mix produttivo. Chiameremo allora tempo medio d'attesa per il mix produttivo P processato sotto una politica di controllo ottimale C_P la quantità W_{C^P} . Considerando un processo Markoviano d'entrate dei componenti nel sistema e tempi esponenziali di processo, e assumendo che il sistema possa essere descritto in termini di una rete possiamo asserire che:

Teorema II

Per un mix produttivo P , mantenendo costanti tutte le altre condizioni operative, W_{C^P} è una funzione monotona decrescente di H_P .

Quest'ultimo crea una prima correlazione fra la funzione entropica e le performance del sistema produttivo, ovvero la performance aumenta solo a patto di un aumento della complessità del sistema, ad esempio l'aggiunta di una macchina operativa su un gruppo di componenti fa aumentare la complessità in quanto si aggiungerebbero tempi di operazione per una parte su altra macchina, ma nel complesso tenderebbero a diminuire i tempi d'attesa delle altre.

Teorema III

Dato un sistema operante su un mix di produzione P a due livelli di complessità statica H_P^+ e H_P^- tali che $H_P^+ \geq H_P^-$ ed esiste una quantità infinitesima $\epsilon > 0$ tale che sommata a entrambi porti ai tempi medi di attesa $W_{C^P}^+$ e $W_{C^P}^-$ sotto la politica di controllo C^P

quindi

$$W_C^+ - W_C^{*P} \leq W_C^- - W_C^{*P}$$

E' importante notare come i precedenti teoremi si riferiscano a sistemi operanti sotto politiche di controllo ottimali. Nei sistemi produttivi reali difficilmente si riesce ad operare a simili livelli, in genere si cerca comunque di fissare un'adeguata politica di controllo e mantenerla costante per più cicli di produzione, pertanto possiamo cercare di allargare la precedente proposizioni a tutte le politiche di controllo stazionarie.

Sia quindi C una politica di controllo stazionaria (a differenza di C^P politica di controllo ottimale), consideriamo due scenari tali che i livelli di complessità statica per lo stesso mix di produzione P siano $H_P^+ \geq H_P^-$ siano anche W_C^+ e W_C^- i tempi medi di attesa sotto la politica di controllo stazionaria o ottimale del primo e W_C^{*P} del secondo.

Teorema IV

Dati due sistemi che producono uno stesso mix di componenti P, con complessità statica rispettivamente H_P^+ e H_P^- tali che $H_P^+ \geq H_P^-$, allora se C è una politica di controllo stazionaria e tutte le altre condizioni operative rimangono costanti sarà:

$$W_C^+ - W_C^{*P} \leq W_C^- - W_C^{*P}$$

Le precedenti ipotesi pretendevano una ψ costante mentre spesso può essere necessario studiare l'effetto di variazioni nelle proporzioni del mix di produzione, dato che richieste extra di componenti per la manutenzione, oppure ritardi nelle consegne delle materie prime o semplicemente il non coincidere del lotto d'acquisto di parti commissionate fuori dall'impresa con il lotto di produzione possono richiedere continue ripianificazioni delle quantità di componenti da produrre. Quindi le proporzioni del mix produttivo possono essere considerate variabili decisionali per aumentare o diminuire la complessità statica. Possiamo allora asserire che questa preposizione permette ai pianificatori di un sistema manifatturiero di selezionare sistemi che hanno un miglioramento massimo di prestazione dovuto a risorse addizionali.

Teorema V

Il tempo medio d'attesa è minimo quando la complessità statica è massima per lo stesso mix di produzione se:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \bar{w}_{ijkl} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \bar{w}_{ijkl} \text{ per } \forall k \text{ e } k'$$

Cioè massimizzare la complessità statica (e quindi la flessibilità del sistema) corrisponde a minimizzare il tempo medio di attesa e quindi massimizzare il tempo di produzione.

Si possono quindi determinare n tipi di componenti su N disponibili tali da massimizzare **HP** con condizioni

$$\sum_{i=1}^n \psi_i = 1$$

tale che $\psi_i \geq X_i \forall i$, e $\sum_{i=1}^{(M)} M_i \leq n$ dove $M_i = 1$ per $\psi_i \neq 0$ e $M_i = 0$ per $\psi_i = 0$

Quindi si può concludere che la selezione di n parti del mix produttivo tali da massimizzare la complessità statica consente di massimizzare la produzione.

Considerazioni sul lavoro di Abhijit V.Deshmukh, Joseph J.Tavalage, Moshe M. Barash

Il lavoro è molto rigoroso dal punto di vista matematico ed è adeguato ai dati realmente ottenibili su un sistema produttivo, anche se è di difficile applicazione per una mancanza nella pratica di formulazione delle politiche di controllo e della loro applicazione nella funzione entropica. I tempi di operazione normalizzati sono invece dati facilmente ottenibili dalla pianificazione dei processi produttivi, per cui, specialmente grazie all'ultimo teorema, questa formulazione della funzione entropica risulta utile e concreta nella elaborazione di regole decisionali relative al mix produttivo in fase di pianificazione del processo.

Nel 2006 **SB.Yu, J.Efstathiou** [102] partendo da una misura della complessità basata sul modello entropico, definiscono e misurano in particolare due complessità riferite alla rilavorazione di pezzi difettosi che devono essere re-inseriti nel processo produttivo per essere corretti, trovando un'ulteriore applicazione della formula di Frizelle e Woodcock [100].

Obiettivo del lavoro è il calcolo della complessità di indirizzamento (routing) di un componente all'interno di una linea di produzione alla presenza di celle di riparazione/"rifabbricazione", calcolando una possibile ripartizione dei costi di produzione del componente come somma:

$$TC = IC + RC + CC$$

La complessità di routing, non si intende come complessità di programmazione, come visto in precedenti lavori, ma come complessità derivante dalla ripetuta riparazione di un elemento che non riesce a passare l'ispezione.

Secondo gli autori esistono 5 tipologie diverse di celle di riparazione rappresentate in fig. 7.4.1.

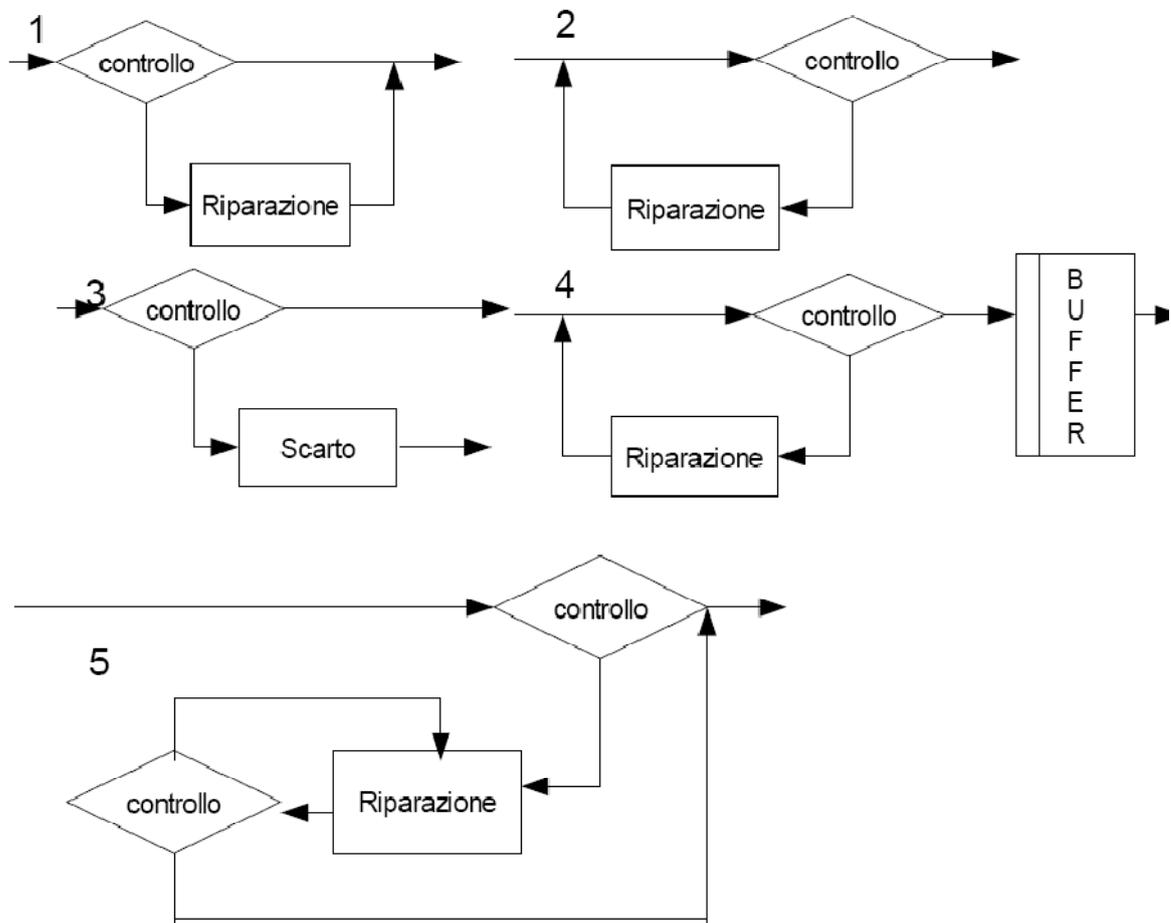


Fig. 7.4.1 rappresentazione schematiche di celle di riparazione [102]

Vengono pertanto esaminati due aspetti specifici della complessità di un sistema produttivo legati al problema delle difettosità.

Consideriamo p con $0 \leq p \leq 1$ la frazione di componenti respinti dall'ispezione e inviati alla riparazione prima di essere immessi nuovamente nella linea di produzione e λ con $\lambda > 0$ la frequenza di arrivo dei semilavorati all'ispezione. La cella di riparazione dovrà allora essere dimensionata per un numero R di pezzi pari a:

$$R = \text{int}(\lambda t) + 1$$

in cui

R numero dei pezzi che hanno cambiato la loro posizione nel periodo di riparazione

M lunghezza di disordine pari alla differenza di posizione del pezzo immesso nuovamente nella linea, M misura il disordine di sequenza, in tal caso sarà $R = \max(M) + 1$

T tempo extra per la ri-lavorazione e per consentire al pezzo di rientrare nel flusso dei pezzi prodotti

λ numero di pezzi in arrivo per unità di tempo

La *complessità di disordine di sequenza* è pertanto dovuta alla differente posizione che assumono i pezzi ri-lavorati rispetto alla sequenza di produzione di partenza, è chiaro infatti che un pezzo difettoso dovrà ritornare ad una fase produttiva a monte a seconda del tipo di difetto per essere rilavorato e corretto e quindi uscirà in posizione retrocessa. La differenza della posizione tra le due sequenze è la lunghezza del disordine.

La misura della complessità di sequenza è data dall'equazione:

$$H_q = - \sum_{j=-(R-1)}^{(R-1)} P[M = 1] \log_2 P[M = 1]$$

dove

H_q complessità di disordine di sequenza

$R = \text{int}(\lambda T) + 1$ zona di riparazione, cioè

$P[M = i]$ probabilità che il pezzo venga re-immesso dopo M parti

Esempio:

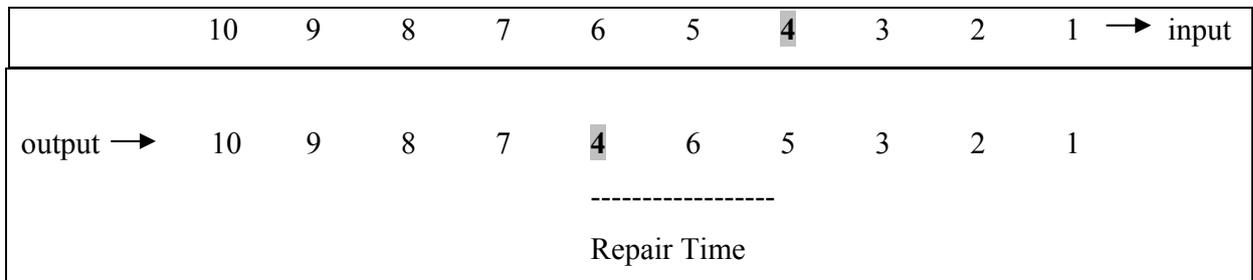


Fig. 7.4.2. visualizzazione grafica delle sequenze di lavorazione in cui il pezzo viene rimandato alla stazione 4 e del relativo tempo di riparazione [102]

lunghezza di disordine $M=2$

Si considera quindi il secondo tipo di cella di riparazione riproposto in fig. 7.4.3.

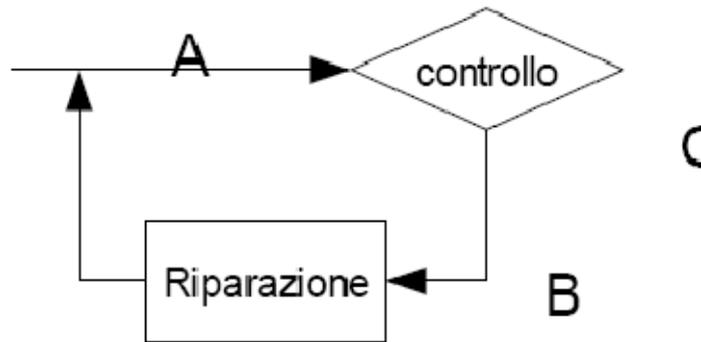


Fig. 7.4.3

Il pezzo può essere controllato e ritenuto valido con route AC, controllato e mandato ad essere riparato una volta con route AB-A-C, oppure controllato, riparato e ricontrollato finché non passa il controllo con route A-B-A-B-A-C, A-B-A-B-A-B-A-C e così via. Si definisce pertanto, partendo dalla classica formula entropica, la *complessità di routing* che può essere considerata come un aspetto della flessibilità del flusso di pezzi nella linea di produzione. All'interno di ogni cella produttiva è possibile individuare diverse "routes" disponibili che incrementano la complessità del sistema e la difficoltà a controllarlo.

$$H_r = - \sum_{i=1}^N P_i \log_2(P_i)$$

dove

H_r è l'entropia di routing del sistema

N numero di "routes" differenti da $j=1, \dots, N$

P_j è la probabilità di un pezzo di attraversare la "route" j

assumendo r come probabilità di fallimento della fase di riparazione:

$$H_s = - \left[\underbrace{(1-p) \log_2(1-p) + p \log_2 p}_I + \frac{p}{1-r} \underbrace{(1-r) \log_2(1-r) + r \log_2 r}_{III} \right]$$

dove

I è l'entropia causata dalla fase di controllo del pezzo

II è la probabilità che un pezzo sia rimandato alla riparazione più volte, ed è quindi un fattore determinato dai possibili loop

III è l'entropia causata dal fallimento della riparazione.

La misura di queste due complessità consente la progettazione e gestione ottimale delle celle di ri-lavorazione, tenendo conto che la complessità di tali celle non può aggiungere valore in quanto il fatto che il prodotto sia difettoso e debba essere rilavorato costituisce già di per se stesso un fattore negativo.

Nel 2006 *S.Sivadasan, J.Efstathiou, A Calinescu e L.Huaccho Huatuco* [103] utilizzano la misura entropica basata sulla teoria dell'informazione per definire una *complessità di gestione della catena di fornitura* che deriva dalle deviazioni in quantità o tempo dell'arrivo delle merci. La complessità è in questo caso la quantità di informazione richiesta per descrivere lo stato del sistema in termini di variazioni di quantità o tempo attraverso i flussi di materiali e informazioni esistenti. Il sistema è sottocontrollo (in-control) quando non ci sono variazioni nei flussi, è fuori controllo (out-of-control) quando i flussi reali divergono da quelli programmati al di là di un livello tollerabile.

La complessità operativa è definita come:

$$H_0(SC) = - \sum_{j=1}^F c_j \sum_{i=1}^U (1 - P_{ij}) \sum_{k=1}^R \sum_{l=1}^{NS} P_{ijkl} \log_2 P_{ijkl}$$

in cui

F numero delle variazioni di flusso

c_i numero di osservazioni richieste durante un particolare intervallo di tempo per il quale la variazione di flusso i è monitorata dal controllore

U numero dei prodotti

R numero di ragioni per cui vi sono delle variazioni di flusso, in genere a causa del fornitore S, del cliente C o altro motivo

p_{ij} probabilità del prodotto j attraverso la variazione di flusso i di trovarsi nello stato programmato (in-control)

NS numero di stati non programmati (out-of-control) attraverso il flusso i per il prodotto j a causa della ragione k

p_{ijkl} probabilità del prodotto j attraverso il flusso i di trovarsi in uno stato non programmato l (out-of-control) per la ragione k .

Per ridurre la difficoltà del calcolo della probabilità si verifica semplicemente quante volte si presenta una classe di stati su un totale di stati osservati, considerando che gli scostamenti si registrano nella variazione di flusso informativo e di materiale (sul tempo di consegna e sulla quantità, sia dal fornitore che al cliente). Nella tabella 7.4.1 viene mostrato come vengono raccolti

i dati: per ogni stato relativo al prodotto, al tipo di flusso (in genere dal fornitore o al cliente) e per ogni causa sono segnati gli scostamenti dal limite inferiore LB e superiore UB ed il numero delle occorrenze.

Raggruppando i dati ottenibili si possono così avere diversi livelli di dettaglio:

- si possono considerare le probabilità degli stati in relazione ai flussi ai prodotti e alle cause
- si può altresì considerare le probabilità degli stati solo in relazione alle cause senza considerare le differenze per prodotto
- viceversa si possono considerare le probabilità in relazione ai prodotti senza considerare le cause degli scostamenti
- infine si possono considerare le probabilità di ogni stato raggruppando le occorrenze dei vari prodotti e delle varie cause.

Scostamenti di flusso (i)	Frequenza dei monitoraggi (ci)	Prodotto (j)	Prodotto A (j=1)					Prodotto B (j=2)					
			Stato (l)	LB	UB	Motivazione (k)			LB	UB	Motivazione (k)		
						C (k=1)	S(k=2)	O(k=3)			C (k=1)	S(k=2)	O (k=3)
Forniture previste (i=1)	1 per settimana (c1)	IC	0	0	46			2	-2	23			
		OC1	-5	0		3		-5	-2		4		
		OC2	-10	-5	9			-10	-5	32		6	
		OC3	0	3	8			2	3				
		OC4	3	10	7	4	3	3	10	40			
		OC5	altro		4		4	altro		4	3	8	
Ordini di consegna	45 per settimana (c2)	IC	1	-1	90			1	0	66			
		OC1	-5	-1		1		-5	0		1		
		OC2	-10	-5		5		-10	-5		8		
		OC3	1	3	3			1	3	4		3	
		OC4	3	10		4		3	10	1		2	
		OC5	altro					altro			6		

Tab. 7.4.1 Raccolta dati per il calcolo della complessità di gestione della fornitura [103]

Questa misura della complessità implica anche considerazioni sulla ragione per cui occorre un evento non programmato anziché uno programmato, anche se non tutti gli stati non controllati hanno sempre associata una causa, nel qual caso il sistema registra che non ci sono ragioni disponibili.

Per esempio la probabilità p_{12} della variazione di flusso $i=1$ per il prodotto $j=2$ viene calcolata attraverso il numero di eventi in-control divisi per il numero totale di eventi 100.

La probabilità p_{1212} è ottenuta dividendo il numero di volte che attraverso la variazione di flusso $i=1$ per il prodotto $j = 2$ la variazione cade nello stato out-of-control $l = 2$ ed è attribuita alla ragione $k=1$ per la somma di tutte le ricorrenze dovute a $i = 1, j = 2, k = 1$.

La forma dell'equazione è tale che, controllando un elemento addizionale attraverso le variabili i,j o k di un sistema (così come per esempio F,U , o R aumentati di 1) aumenta il valore di complessità operativa del sistema. Questo deriva dall'assumere che la distribuzione della probabilità per il prodotto originale attraverso gli stati out-of-control resti invariata.

Ciononostante ci sono casi in cui questa ipotesi della distribuzione inalterata della probabilità non regge e quindi la complessità operativa del sistema non cresce necessariamente con il numero di elementi (ex. prodotti, ragioni ecc.) considerati all'interno delle variabili monitorate, ma invece dipende dalla natura delle variazioni monitorate e dagli stati definiti. Per esempio nel caso in cui introdurre un nuovo prodotto limiti i prodotti esistenti in un modo che porti il sistema ad essere più prevedibile, la complessità operativa diminuisce.

Queste considerazioni portano alla conclusione che, dato il numero di elementi monitorati per ciascuna variabile, la natura delle variazioni in termini della distribuzione della probabilità attraverso gli stati, così come il numero dei prodotti monitorati, determinano la complessità totale del sistema.

Considerazioni sul metodo proposto da S.Sivadasan, J.Efstathiou, A Calinescu e L.Huaccho Huatuco:

Il metodo risulta estremamente dettagliato su più livelli e valido per lo studio della catena di fornitura. Un punto debole che si riscontra in questa applicazione della funzione entropia è il fatto che la probabilità (e di conseguenza la complessità) non tiene conto dell'entità dello scostamento del flusso considerato, e di conseguenza la complessità stessa, l'allocazione della complessità e la relativa localizzazione delle sorgenti possono risultare falsate.

Una metodologia del genere è comunque valida ed è perfettamente applicabile a qualsiasi livello della catena logistica, considerando infatti il concetto di cliente interno qualsiasi fase del processo produttivo possiede dei clienti (le fasi successive) e dei fornitori (le fasi precedenti), ognuno dei quali può presentare ritardi o disfunzioni. Una tale applicazione però dovrebbe tener conto non solo delle probabilità relative alle osservazioni degli stati, ma anche di altri fattori

relativi al livello di risorse spese per ogni fase produttiva. Una metodologia che tenesse conto di tali fattori potrebbe essere un ottimo passo in avanti verso un indice di complessità generale e una possibile correlazione con i costi.

Considerazioni finali sul metodo entropico di calcolo della complessità

Dall'analisi dei precedenti lavori dove si calcola la complessità attraverso la funzione entropia, emerge che questo metodo è preciso e affidabile e che certamente una corretta valutazione della complessità non può prescindere da tale funzione.

Pertanto si può concludere che l'elaborazione di un metodo originale comporta necessariamente la considerazione dell'entropia del sistema come rappresentazione del suo stato e l'inserimento in tale funzione di tutti quei fattori che definiscono il sistema da un punto di vista strutturale e funzionale.

7.5 Metodo 5: complessità calcolata con metodologie ibride

In tutti gli ambiti scientifici nei quali è possibile operare una classificazione di metodologie finalizzate a un qualsivoglia scopo, è necessario aggiungere una categoria ibrida nella quale ricadono tutti i metodi originati dall'integrazione di altri metodi. Il metodo ibrido infatti consente di unire i punti di forza di metodologie differenti e spesso finisce per essere pertanto quello più utilizzato.

Non fa eccezione il calcolo della complessità, nel presente paragrafo si esaminano alcuni metodi ibridi, che risultano dall'integrazione di due o più delle metodologie riportate nei capitoli precedenti.

Le considerazioni che verranno fatte relativamente a ciascun metodo sono utili ai fini dell'elaborazione del metodo originale qui proposto, che infatti apparterrà alla categoria delle metodologie ibride, data l'evidenza che deriva dallo stato dell'arte circa l'efficacia e predominanza di questa modalità.

Metodi 1 (dati oggettivi) – 2 (interviste)

Nel 1992 *William W. Cooper, Kingshuk K. Sinha, Robert S. Sullivan* [104] sviluppano una misura ibrida della complessità che utilizza indicatori rilevabili dal sistema e punteggi attribuiti dagli operatori sulla base di interviste, come chiave per lo sviluppo di un metodo di confronto dello stato di un sistema produttivo nel tempo e rispetto alle prestazioni di impianti produttivi della concorrenza, il lavoro è fortemente correlato ad un altro che seguirà qualche anno dopo, già citato nel capitolo 3 [56].

Anche qui viene considerato il caso di un impianto produttivo di semiconduttori (wafer), essendo la fabbricazione di fette di silicio, uno dei processi produttivi esistenti più complesso a causa delle tolleranze minime richieste e dell'elevato numero di elementi di cui è composto un microchip, per il sofisticato livello di tecnologia richiesto e per l'alto livello di segretezza che ne deriva da parte delle imprese. Di conseguenza la possibilità di compiere scelte strategiche basandosi su indici di valutazione interni all'impresa risulta particolarmente significativa rispetto all'utilizzo di altri metodi decisionali.

Il processo di fabbricazione dei chip prevede otto passaggi:

1. Fabbricazione del wafer: I wafer, ovvero dischi di silicio levigati, vengono stampati con fitti reticoli di circuiti integrati. Ogni parte di circuito che racchiude l'architettura completa di un chip è chiamato in gergo stampo (die, pl. Dice)
2. Prova del wafer. Vengono testati uno per uno gli stampi, quelli non conformi vengono segnati con dell'inchiostro. Generalmente ogni tipo di wafer dà origine ad un tipo di chip, capita a volte che per un tipo di chip servano più tipi di wafer o che viceversa un wafer sia composto da più tipi di chip. In questi ultimi casi la prova del wafer non viene fatta subito dopo la fabbricazione perché risulta troppo complicato fare più tipi di test sullo stesso wafer.
3. Inventario degli stampi funzionanti
4. Assemblaggio dei circuiti: i wafer vengono tagliati, gli stampi segnati scartati, e quelli funzionanti montati su supporti di plastica o ceramica per creare le piastre
5. Test di massima: le schede vengono testate per una o più delle loro caratteristiche allo scopo di valutare le loro prestazioni e successivamente catalogate in contenitori
6. Inventario dei tipi di scheda
7. Test finale: le schede di ogni contenitore vengono selezionate e testate sulla base delle specifiche richieste dal cliente
8. Inventario del prodotto finito.

È interessante notare come il concetto di complessità venga, al contrario di quanto fatto da altri autori, distinto dai concetti di indefinibilità e caos nel seguente modo:

- Complessità: molti elementi con numerose ma relativamente semplici interrelazioni.
- Indefinibilità: pochi elementi ma molti livelli di relazione.
- Disordine: molti elementi (o anche pochi) che interagiscono in modi che non portano a comportamenti prevedibili per ciascun elemento individuale.

Quindi viene definita una *complessità di sistema* come numero di elementi e numero di relazioni di primo ordine tra gli elementi, escludendo relazioni di ordine più complesso.

Un sistema è più complesso di un altro semplicemente se il numero di elementi simili e di relazioni di primo ordine tra gli elementi del primo è maggiore di quello del secondo.

Le due fondamentali tecnologie di funzionamento dei chip, la NMOS e la CMOS si sono evolute nel tempo variando il mix di prodotti con differenti caratteristiche di progetto, mix di tecnologie di processo differenti per numero di fasi di lavorazione e difficoltà associata a flussi caratteristici di processo che differiscono per tempi di ciclo e di attraversamento.

Per la valutazione della complessità di tali caratteristiche sono stati proposti i seguenti indici:

1. *Indice di prodotto:*

che si riferisce a dimensione e memoria.

Il portafoglio di chip prodotti da un impianto varia generalmente dai 15 ai 20 tipi, differenti in dimensioni, progetto e memoria associata. L'indice di prodotto è stato pensato quindi per normalizzare le differenze delle caratteristiche progettuali. Per calcolarlo occorre fare il rapporto fra il massimo numero di bit ottenibili da un tipo di wafer e il numero massimo di bit ottenibili dal wafer di base, dove per wafer di base si intende quello con il minor numero di bit ottenibili fra i tipi di wafer producibili nell'impianto, per calcolarlo si dovrà quindi:

- identificare i tipi di wafer associati all'i-esimo tipo di chip
- identificare il numero massimo di stampi che può essere prodotto per ogni wafer corrispondente ad uno specifico tipo di chip $C_{MAX}(i)$
- identificare i bit di memoria associata ad ogni tipo di chip $M(i)$, questo valore può essere moltiplicato per il numero massimo di stampi per ogni wafer $C_{MAX}(i)$
- usare il tipo di chip con il prodotto $C_{MAX}(i) \cdot M(i)$ come tipo base b e calcolare l'indice di prodotto per l'i-esimo tipo di chip che sarà allora

$$PROD(i) = \frac{[C_{MAX}(i) - M(i)]}{[C_{MAX}(b) - M(b)]}$$

in cui:

$PROD(i)$ indice di prodotto per l'i-esimo chip di tipo i

$C_{MAX}(i)$ numero massimo di chip che possono essere prodotti da una fetta di silicio corrispondente all'i-esimo tipo di chip

$M(i)$ numero di bit di memoria associati all'i-esimo tipo di chip

$C_{MAX}(b)$ numero massimo di chip che possono essere prodotti da una fetta di silicio corrispondente al chip base b

$M(b)$ numero di bit di memoria associati al chip base b

2. *Indice di processo:*

misura il grado di difficoltà del processo

- misura il livello di difficoltà di un processo cioè il numero di attività critiche presenti, l'indice di normalizzazione del processo sarà dunque il rapporto fra il numero di attività critiche del processo combinate con il loro livello di difficoltà e il numero di attività critiche del processo base, che sarà inteso come il processo avente il minor numero di attività critiche. Per calcolarlo bisognerà:

- identificare il numero dei tipi di processi t utilizzati per la produzione dei wafer
- per ogni tecnologia t identificare il numero di attività associate ad ogni fase critica s che chiameremo $A(s,t)$
- associare una valutazione “soggettiva” $D(s)$ usando una scala da 1 a 5 ad ogni attività della fase critica s
- per ogni processo valutare il numero totale di difficoltà ponderate

$$PROC(t) = \frac{DA(t)}{DA(B)}$$

in cui:

$PROC(t)$ indice di flusso di processo per la tecnologia t

$DA(B)$ numero totale di difficoltà per le attività associate al processo base B

e in cui:

$$DA(t) = \sum A(s, t) \times D(s)$$

dove:

$DA(t)$ numero totale di difficoltà per le attività associate alla tecnologia di processo t

$A(s,t)$ numero di attività in fase critica s per la tecnologia di processo t

$D(s)$ grado di difficoltà associato con la attività di una fase critica s

3. *Indice prodotto-processo:*

indica le interazioni prodotto-processo consentendo di tenere conto da una parte delle differenze di progetto e dall'altra delle unicità di processo produttivo dei prodotti.

Spesso si fabbricano wafer ibridi utilizzando più processi in due differenti periodi, o lo stesso tipo di wafer può essere sottoposto a due tipi di processi per ottenere i risultati voluti, di conseguenza è necessario un indice moltiplicativo che renda possibile i confronti fra diversi tipi di prodotto sulla base dei processi utilizzati per fabbricarli, tale indice è:

$$PPI(i) = PROD(i)*PROC(t)$$

PPI(i) = indice di prodotto-processo per l'i-esimo tipo di chip

4. *Indice flusso di processo:*

consente di confrontare i prodotti nonostante le loro differenze in termini di tempi dei cicli di lavorazione riportandoli a periodi definiti (per ex. su base mensile)

E' necessario a normalizzare le differenze di tempo di ciclo per i vari tipi di chip i volumi dei quali sono stati registrati al termine del periodo unitario di tempo. Tale indice serve quindi a sincronizzare i chip prodotti durante vari tempi di ciclo in un'unica unità di tempo, come ad esempio un mese, sebbene il tempo di ciclo sia in realtà maggiore o minore del tempo unitario scelto.

$$PFLOW(i,j) = T / CT(i,j)$$

in cui

PFLOW(i,j) indice di flusso di processo per l'i-esimo tipo di chip prodotto nel j-esimo periodo

T lunghezza del periodo preso come unità di tempo

CT(i,j) tempo del ciclo per l'i-esimo tipo di chip prodotto nel j-esimo periodo.

5. *Total Net Die Equivalent:*

fornisce la misura della complessità delle operazioni dell'impianto, tramite il quale allocare i costi variabili dell'impianto. Viene ottenuto tarando il volume di ogni tipo di chip prodotto alla fine del periodo di riferimento con gli indici di prodotto-processo e processo-flusso, ottenendo una normalizzazione del volume dei chip prodotto in ogni periodo di riferimento per differenze nel progetto, nelle tecnologie di processo e nei cicli di lavoro. A partire dal TNDE viene inoltre definito un nuovo tipo di unità di costo che l'azienda può utilizzare per analizzare l'andamento dei costi di fabbricazione nonostante i cambiamenti nei prodotti e nei processi.

Si ottiene moltiplicando i volumi di produzione dell'i-esimo tipo di chip nel j-esimo periodo $V(i,j)$ per l'indice di processo prodotto di $PPI(i)$ e per l'indice $PFLOW(i,j)$:

$$TNDE(j) = \sum V(i,j) * PPI(i) * PFLOW(i,j)$$

in cui:

TNDE(j) Total Net Die Equivalent per il periodo j

$V(i,j)$ volume dell' i -esimo tipo di chip prodotto nel j -esimo periodo.

Il TNDE viene quindi usato dagli autori per analizzare i costi di produzione dei chip, dato che la sua natura di indice dei volumi di produzione pesati in base alla difficoltà di fabbricazione dei diversi tipi di prodotto e dei diversi processi produttivi, risulta più indicativa della complessità e sforzo produttivi rispetto ad altri indici di produzione.

Gli autori suggeriscono un utilizzo di questi indici che possono essere calcolati a partire da misure fatte dai responsabili delle diverse aree (ingegneri di prodotto, di processo, responsabili del marketing ecc.) come base per aggiustare e coordinare i cambiamenti nelle attività produttive.

Considerazioni sul metodo di Cooper, Sinha, Sullivan:

Punti di forza:

- utilizza dati del sistema analitici e oggettivi
- applicazione abbastanza semplice

Punti di debolezza:

- non individua un indice unico che esprime la complessità del sistema, ma più indici
- applicazione limitata al settore specifico dei wafer
- occorre una interpretazione e integrazione dei risultati
- tempi e costi di applicazione e interpretazione medio-lunghi.

L'aspetto più interessante del lavoro risulta certamente la correlazione fra la complessità e i costi. Riferendosi in modo specifico al settore dei microchip lo studio è poco utile allo scopo di individuare un metodo di valutazione generale. La relazione logaritmica fra complessità e costi è una funzione che consente il calcolo della complessità di sistema e l'influenza sui costi della complessità costituisce certamente una delle possibili finalità di uno studio di complessità.

Altro metodo ibrido che raccoglie dati dall'impianto produttivo e tramite interviste agli operatori è quello proposto nel 1996 da **John Paul MacDuffie, Kannan Sethuraman, Marshall L. Fisher** [105] dove vengono definite quattro misure della complessità di prodotto a partire da un'indagine svolta su 70 fabbriche di assemblaggio di automobili sparse in 16 paesi. I dati analizzati provengono in realtà da 62 stabilimenti, in quanto vengono tralasciate 8 fabbriche che producono prodotti speciali di lusso.

- *Complessità di mix di modello*: misura la varietà basata sul mix di differenti prodotti e varianti di prodotto. Include differenti piattaforme, modelli, stili e variazioni per l'esportazione.

Ogni elemento che concorre alla misura di questo fattore viene pesato in accordo con i dati delle interviste ai manager di produzione attribuendo punteggi distinti:

- 10 punti per ciascuna piattaforma unica
 - 5 punti per ciascun modello unico
 - 5 punti per ciascun elemento di stile
 - 3 punti per fronte, retro e tutte le ruote motrici
 - 3 punti per l'opzione guida destra e sinistra per modello.
- *Complessità delle parti*: che misura un livello intermedio di complessità tra una fondamentale e una periferica, è un indice costruito a partire da due gruppi di variabili. Il primo sottogruppo include tre misure di parti o variazioni di componenti: numero di motori, cablaggio, e colori della carrozzeria, elementi che influiscono sulla sequenza dei veicoli, la varietà dei sub-assemblaggi richiesti, e il flusso del materiale e delle parti attraverso il sistema. Il secondo gruppo comprende tre misure: il numero di parti totali nell'area di assemblaggio, la percentuale di parti comuni attraverso i modelli e il numero di fornitori dell'area di assemblaggio. Tutte le variabili sono calcolate su una scala da 1 a 6, dove 1 è il più basso e 6 il più alto livello di complessità. Il fattore Alpha di Cronbach per questo indice è 0.75.
 - *Contenuto opzione*: è spesso riferito a una varietà periferica, perché consiste in variazioni del prodotto che sono indipendenti dal progetto essenziale e quindi possono essere eseguite senza influenzare il livello di varietà basilare. Viene misurato in termini delle ore di lavoro necessarie per installare l'opzione.
 - *Variabilità di opzione*: è calcolata dai dati dell'impianto sull'estensione per la quale i veicoli contengono ciascuna delle opzioni considerate. E' la somma della deviazione standard delle possibili opzioni $i=1, \dots, n$ viste come variabili random μ_i con probabilità che un'auto a caso posseda l'opzione i : $\sum_{i=1}^n \sqrt{\mu_i(1 - \mu_i)}$

A partire dal valore delle variabili sopra riportate viene quindi calcolato con tecniche di regressione lineare un *indice di organizzazione di produzione* che consente di misurare come la fabbrica organizza e gestisce il suo sistema di produzione e la sua forza lavoro e che quindi risulta correlato alle misure di complessità sopra definite.

I risultati mostrano differenze significative nella complessità di prodotto in diverse aree del mondo dove sono ubicati gli stabilimenti produttivi, coerentemente con le differenti strategie di produzione utilizzate. La complessità è in genere più alta negli stabilimenti giapponesi che non in quelli nord americani ed europei e cala nelle fabbriche situate nei paesi di recente industrializzazione. Altro risultato significativo è che gli impianti di “lean production” sono in grado di assorbire e minimizzare gli effetti avversi della complessità di prodotto. Infatti nel caso degli impianti di questo tipo non si rileva statisticamente una relazione significativa tra le misure di complessità di prodotto e la produttività di lavoro. Al contrario negli impianti di tipo “mass production” la complessità di prodotto è fortemente legata al numero di ore di lavoro necessarie per ciascun veicolo.

Considerazioni sul metodo di *MacDuffie, Sethuraman, L.Fisher*

Se da una parte l’aumento di flessibilità e di varietà di mix di prodotti ha determinato un ovvio aumento di complessità, in base ai risultati dell’inchiesta, le recenti modalità di costruzione di uno stabilimento produttivo consentono rispetto al passato di ottenere impianti meno complessi, quindi l’evoluzione nei layout e nei macchinari di produzione ha determinato da questo punto di vista un calo di complessità.

Punti di forza:

- utilizza dati del sistema analitici e oggettivi
- applicazione abbastanza semplice

Punti di debolezza:

- mancanza di una definizione e misura di un indice unico di complessità, ma scissione in diverse complessità
- elevato numero di informazioni richieste
- applicazione allo specifico settore automobilistico
- necessità di un software articolato di supporto per la elaborazione dei dati

Nel 2004 *Marco Perona e Giovanni Migliarotta* [106] approfondiscono l’influenza della complessità sulle prestazioni della produzione e della catena di fornitura di un’azienda manifatturiera. Gli autori si rifanno a precedenti ricerche, dove emerge che varietà, controllo della complessità e prestazioni dell’azienda sono tra loro correlati.

Le fasi del lavoro sono tre:

1. raccolta dati
2. elaborazione di un modello interpretativo
3. elaborazione di un modello normativo

1. La raccolta di dati viene realizzata tramite un *questionario* inviato a circa 60 imprese. Le domande vertono su tre argomenti:

1. Collaborazione con i fornitori
2. Modularità del prodotto
3. Sistema informativo per la pianificazione e il controllo della produzione.

Per ognuno dei tre punti sopra viene sviluppato un indice di complessità da combinare con gli altri per ricavare un *indice di complessità* globale ma riferito specificatamente *alla catena logistica*.

Vengono di seguito descritti con maggior dettaglio i tre punti:

1. Al fine di descrivere come le aziende manifatturiere gestiscono la complessità nelle loro catene di fornitura, vengono svolte delle interviste in alcune imprese con i manager delle seguenti funzioni aziendali: vendita, acquisti, distribuzione, pianificazione e controllo della produzione, ingegneria di prodotto, ingegneria di processo, qualità, amministrazione, impianto produttivo.

A partire dai dati rilevati tramite le interviste e dai database aziendali (numero dei fornitori, tipologia dei fornitori ecc.) vengono definiti diversi *indici di complessità* in relazione a differenti aspetti.

Un *indice di complessità* riferito ai *fornitori* è calcolato come media tra due indici: il primo misura la durata media della relazione di fornitura attribuendo un punteggio più basso alle aziende che hanno relazioni più stabili e il secondo si riferisce alle politiche di approvvigionamento attribuendo un punteggio più basso alle aziende che evitano contratti spot ma prediligono un sistema di ordini funzionante in integrazione con i fornitori chiave.

La complessità riferita alle forniture pertanto si riduce stabilizzando la relazione con i fornitori il che porta ad una maggiore efficienza del sistema.

Un *indice di complessità* riferito al *prodotto* come somma del numero di componenti e di prodotti finiti. Dai dati raccolti l'ingegneria di prodotto risulta uno dei fattori più influenti sulla complessità, in quanto rappresenta un legame tra marketing e produzione. A questo proposito si sottolinea come la modularizzazione sia un vantaggio ai fini della gestione della complessità più che della sua diminuzione. I sistemi informativi per il controllo e la pianificazione della produzione sono in questo contesto uno strumento efficace per la gestione della complessità.

Per quanto riguarda la *complessità di pianificazione e controllo di produzione* viene definito un indice di complessità semplicemente come il numero di ordini di produzione emessi per anno.

2. Viene quindi proposto un *modello interpretativo* elaborato per definire e classificare le dimensioni e le sorgenti di complessità. Tale modello è basato su cinque dimensioni:

1. ingegneria di produzione
 - risorse di produzione
 - tecnologia
 - layout dell'impianto

Esempi di indicatori: produzione in outsourcing, risorse di produzione automatizzate

2. processo di produzione
 - volumi
 - organizzazione della produzione
 - pianificazione della produzione

Esempi di indicatori: sistema informativo, sistema di manipolazione automatico interno

3. sviluppo di nuovo prodotto
 - struttura
 - co-design e coordinamento
 - lunghezza del ciclo di vita

Esempi di indicatori: strumenti di informazione per il riutilizzo dei componenti, modularizzazione del prodotto

4. logistica di ingresso/uscita
 - volumi
 - rete
 - modalità distributive

Esempi di indicatori: sistema informativo integrato con il fornitore, consegna e magazzino in outsourcing, sistema di stima delle vendite

5. processo di vendita
 - range del prodotto
 - servizi
 - tempo per l'ordine
 - clienti

Esempio di indicatore: sistema informativo integrato con il cliente

Ciascun aspetto è quantitativamente definito pertanto tramite gli indicatori che vengono calcolati a partire da indici che derivano dai risultati delle interviste e dai dati provenienti dai database aziendali.



Fig. 7.5.1 Dimensioni della complessità per sistemi manifatturieri o logistici [106]

3. Proposta di un *modello normativo*, definito per comprendere le connessioni logiche tra la adozione di leve specifiche di controllo della complessità e i risultati raggiunti. Secondo questo modello ogni sistema manifatturiero o logistico è caratterizzato da alcuni obiettivi strategici (posizione leader/follower dell'azienda ecc.), variabili di contesto (appartenenza ad un piccolo/grande gruppo ecc.), risorse disponibili (umane, finanziarie, tecnologiche ecc.) e dalla sua attenzione alle varie istanze della complessità (in generale l'attenzione messa nel controllo e gestione della varietà dentro e fuori il sistema). Le leve possono essere di due tipi: quelle che consentono una riduzione nominale della complessità e le leve manageriali.

Le cause di incertezza possono essere riassunte nelle cinque dimensioni di complessità di cui è composto il modello, ognuna delle quali si rifà ad una specifica funzione aziendale della catena logistica ovvero:

- Sviluppo di nuovi prodotti
 - struttura
 - coordinazione dei progetti e progettazione
 - ciclo di vita del prodotto
- Progettazione del processo produttivo

- risorse di produzione
- tecnologie
- lay-out degli impianti

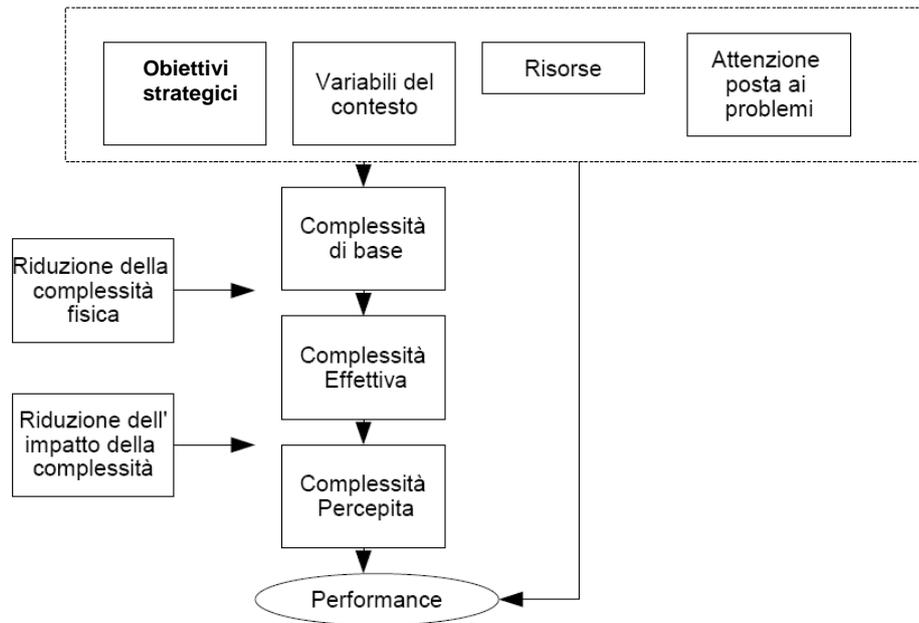


Fig. 7.5.2 modello di complessità [106]

- Processo produttivo
 - Volumi di produzione
 - Organizzazione della produzione
 - Pianificazione della produzione
- Logistica di fornitura e di distribuzione
 - Volumi
 - Reti
 - Modalità di distribuzione
- Commercializzazione
 - Quota di mercato
 - Servizi
 - Tempi di consegna dall'ordine
 - Clienti

I dati rilevati dimostrano che le aziende che controllano e riducono di più la loro catena di fornitura tendono a raggiungere risultati migliori in termini di efficienza e efficacia. Questo modello è pertanto di supporto ai manager nella presa di decisioni riguardanti la produzione dei prodotti.

Inoltre si conclude che il livello di complessità di un sistema produttivo è connesso sia all'efficienza (performance correlata ai costi) sia all'efficacia (performance correlata alle aspettative dei clienti) in egual misura, di conseguenza diminuendo la complessità è possibile migliorare ambedue gli aspetti sopraelencati. I manager possono ridurre la complessità agendo su due fronti: riduzione di tipo fisico della complessità (diminuzione dei prodotti) o riduzione dell'impatto della complessità sull'impresa (aumento della capacità di produzione).

Considerazioni sul metodo di Perona, Migliarotta:

Punti di forza:

- utilizza dati del sistema analitici e oggettivi
- applicazione semplice
- applicazione valida per diversi settori e prodotti
- facile interpretazione dei risultati

Punti di debolezza:

- mancanza di una definizione unica di complessità, in quanto vengono definiti diversi indici relativi a diversi aspetti
 - si basa su un numero limitato di informazioni.
-

Metodi 2 (interviste) – 4 (modello entropico)

Nel 2002 *S.Sivadasan, J Efstathiou, G.Frizelle, R.Shirazi, A.Calinescu* [107] analizzano la complessità gestionale di un sistema produttivo in relazione alla catena di fornitura mettendo a punto una metodologia che consenta di individuare i punti significativi della complessità del sistema. L'approccio utilizzato è ibrido in quanto gli indici vengono definiti in termini entropici a partire da dati rilevati tramite interviste, a questo proposito gli autori si riferiscono anche al lavoro di Meyer e Curley [88].

Non ci si riferisce soltanto alla complessità interna di un impianto di produzione ma, tramite un accurato studio del processo di produzione e assemblaggio, focalizza l'analisi di complessità sul confronto fra produttori considerando il rapporto fra complessità interna ed esterna del sistema, definendo i meccanismi di aumento, generazione e assorbimento di questa, e proponendo in definitiva un ottimo strumento di decisione aziendale per la selezione e il confronto tra imprese.

Il lavoro parte dalla classica misura entropica della complessità basata sul teorema di Shannon:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

in cui

S stato del sistema

$i = 1, \dots, n$

p_i probabilità che lo stato i occorra

Si considera quindi un sistema manifatturiero sul quale applicare la formula della complessità dinamica definita da Frizelle e Woodcock [100]:

$$H(S) = - \left\{ P \log_2 P + (1 - P) \log_2 (1 - P) + (1 - P) \left[\sum_{M^g} \sum_{N_j^g} p_{ij}^g \log_2 p_{ij}^g + \sum_{M^a} \sum_{N_i^a} p_{ij}^m \log_2 p_{ij}^m + \sum_{M^m} \sum_{N_j^m} p_{ij}^b \log_2 p_{ij}^b \right] \right\}$$

vengono definite due classi di stati S:

SS stato del sistema input-output programmato

SNS stato del sistema input-output non programmato

La metodologia pertanto si basa sulla definizione dei possibili stati del sistema e sulla probabilità che essi occorranò. La formula è costituita da due parti, la parte fuori dalle parentesi quadre è riferita alla parte di complessità relativa ad un sistema sotto controllo statistico (stati programmati) e alla parte dentro le parentesi tonde si associa l'incertezza di sapere se il sistema è controllato o no definendo due *Indici di Complessità Operazionale OCI*:

In or Not in Control operational Complexity Index:

$$OCI(S^{INC}) = -P \log_2 P - (1 - P) \log_2 (1 - P)$$

Not in Control operational Complexity Index:

$$OCI(S^{NC}) = \sum_M \sum_{N_i} p_{ij} \log_2 p_{ij}$$

Il modello viene applicato non solo all'ambito produttivo ma anche e soprattutto al rapporto con i fornitori e clienti e a come viene influenzata la complessità interna da quella esterna.

La distinzione tra complessità interna ed esterna è schematicamente rappresentata nelle figure 7.5.3. e 7.5.4.

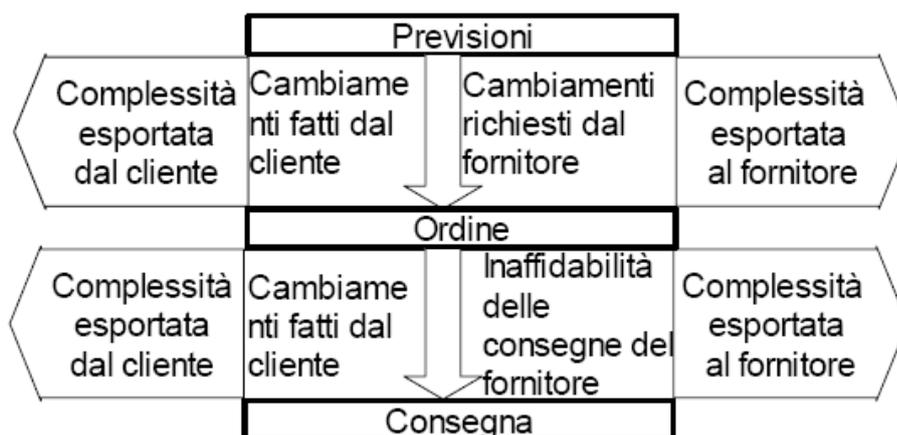


Fig.7.5.3 Trasferimento interno di complessità operativa [107]

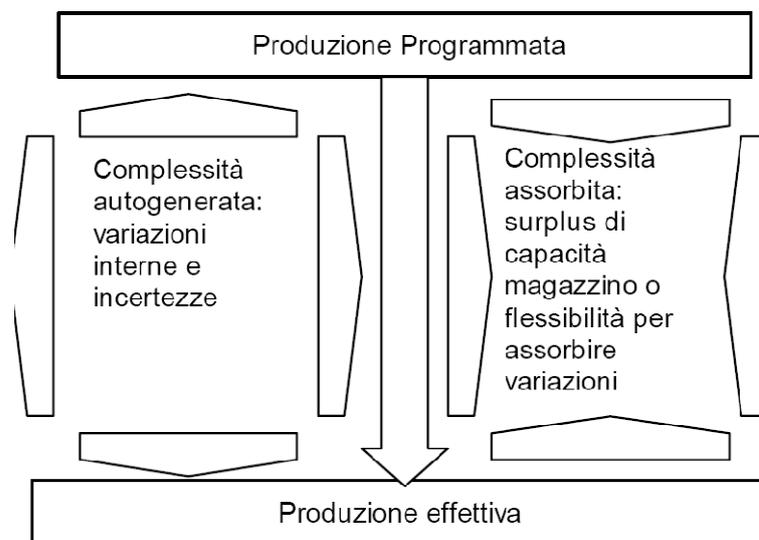


Fig. 7.5.4 Complessità esterna relativa al sistema fornitore-cliente [107]

Una novità assoluta introdotta dagli autori è il trasferimento di complessità tra partner all'interno della catena di fornitura. La complessità all'interfaccia tra cliente e fornitore può essere importata o esportata, aumentando o diminuendo la complessità all'interno del sistema produttivo base. Il trasferimento dipende dalle caratteristiche organizzative dell'azienda e dal suo rapporto con i fornitori, si ricorre a partner proprio per diminuire ed esportare la complessità interna, ma

questo è possibile solo fino ad un certo punto dato che ad esempio la disorganizzazione di un fornitore può creare ritardi nelle consegne e di conseguenza aumentare la complessità di gestione interna del proprio sistema manifatturiero.

La misura entropica rende possibili confronti tra flussi diversamente non confrontabili, permettendo una valutazione del grado con il quale le organizzazioni generano, esportano, importano e assorbono complessità gestionale.

Con riferimento alla figura 7.5.3 possiamo asserire che:

- maggiore è l'incertezza fra previsioni e ordini effettivi di vendita, maggiore è la possibilità di importare complessità operativa dai clienti
- maggiore è l'incertezza fra ordini di vendita e dispacci di produzione, maggiore è la possibilità di importare complessità operativa dai clienti
- maggiore è l'incertezza fra previsioni d'acquisto e ordini d'acquisto, maggiore è la possibilità di esportare complessità operativa verso i fornitori
- maggiore è l'incertezza fra ordini d'acquisto e consegne effettive, maggiore è la possibilità di importare complessità operativa dai fornitori

In tal caso un'impresa ha due modalità di trattare la complessità interna, la complessità può essere generata e autogenerarsi, ad esempio procedure imprecise portano a malintesi e ritardi, oppure può cercare di assorbire la complessità tramite un certo livello di flessibilità che può essere un surplus di capacità produttiva o una parte del tempo di produzione scesca da programmazione per gli imprevisti, come mostrato nella figura 7.5.4.

Viene messa a punto una metodologia ibrida per il calcolo di complessità articolata in sei fasi come illustrato nelle figure 7.5.5. 7.5.6 e 7.5.7.

Fase 1 preparazione:

Bisogna innanzi tutto prendere contatto con l'impresa da analizzare e con i responsabili di produzione che meglio possono spiegare il funzionamento del sistema produttivo, dell'organizzazione dell'impresa e dei flussi di materiale e informativi. E' essenziale a questo livello focalizzare l'attenzione su tre punti:

- pianificazione sufficiente dello studio e ricerca dei dati passati e del contesto in cui opera l'azienda
- organizzazione interna del gruppo di ricerca
- coordinazione esterna con la compagnia con cui si collabora



Fig.7.5.5 Fase 1: preparazione [107]

Fase 2 familiarizzare:

In alcuni giorni si instaura il contatto con il personale degli impianti per comprendere i flussi chiave interni ed esterni di materiali e informazioni. Si cerca inoltre di reperire:

- dettagli ed esempi dei documenti ricevuti, mandati o generati
- delucidazioni sulla sequenza dei tempi delle operazioni e dei compiti
- identificazione dei collegamenti fra persone flussi e processi

I dati raccolti saranno utilizzati per mappare i collegamenti fra persone, flussi informativi e di materiale e i processi attraverso opportuni diagrammi.

Fase 3: progettazione della metodologia di misurazione

A questa fase del processo di studio dell'impresa è necessario considerare alcuni fattori prima di passare alla fase successiva, ovvero la raccolta dati:

- Ruoli chiave e flussi: mappa della fase 2
- Frequenza d'osservazione: una linea guida per stabilire la frequenza di osservazione può essere data dai tempi di ciclo, di trasferimento dell'informazione e dei materiali. E'essenziale durante un'osservazione che il più breve degli stati sia registrato, per cui è possibile considerare la durata di quest'ultimo come frequenza di registrazione. Tuttavia esistono delle differenze fra frequenza ideale e reale utilizzata per le misurazioni.
 - Scegliere le dimensioni della misurazione: per lo studio di una catena operativa è necessario che vengano presi in considerazione i flussi di materiale e informativi, dato che

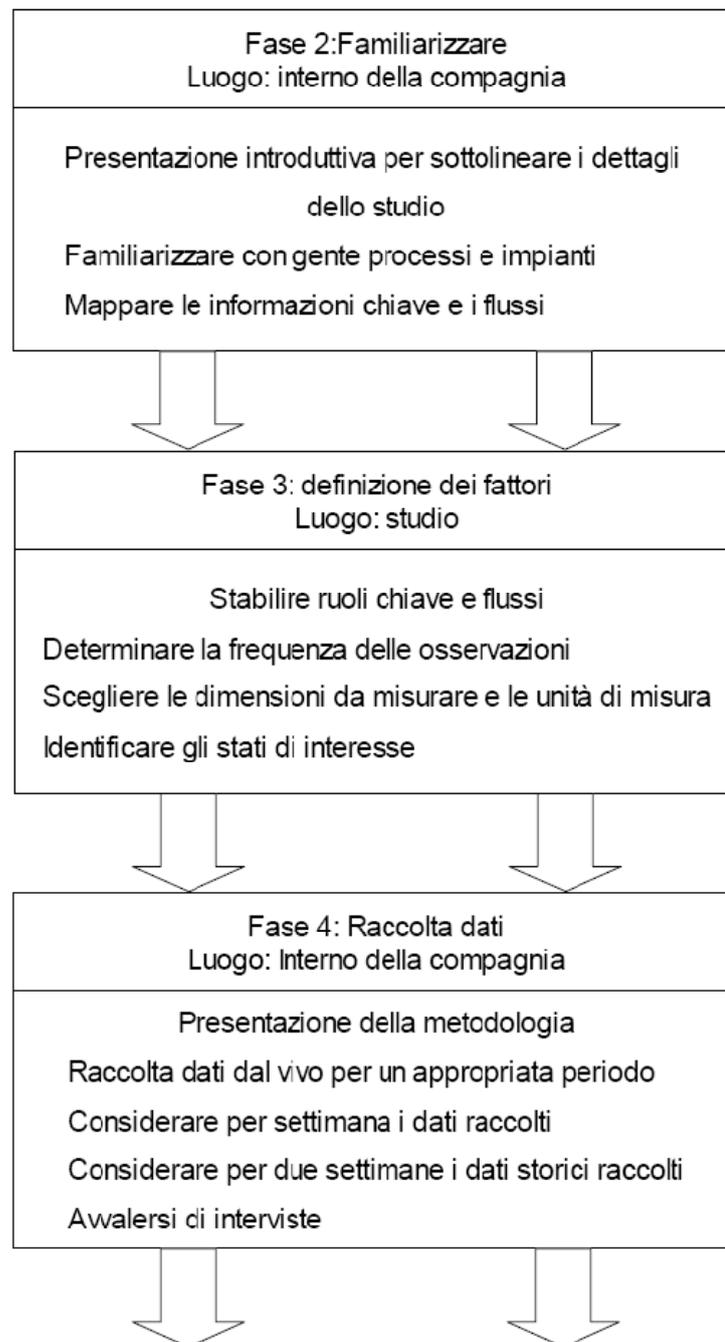


Fig.7.5.6 Fase 2,3,4: preparazione [107]

- l'essenziale della fornitura è che essa arrivi nelle quantità e nei tempi considerati. Per cui le variazioni di materiale e informazioni verranno misurate sulla base della differenza fra i tempi di consegna e le quantità programmate ed effettive.
- Lo stato di interesse : è necessario considerare lo stato più importante relativo al problema descritto, per esempio una quantità può essere rappresentata come l'ammancio fra una e

cinque unità, oppure uno stato temporale può essere descritto come il ritardo fra due e tre ore. La variazione dello stato è determinata dalla significatività della varianza per quanto riguarda l'organizzazione, gli stati caratterizzati da nessuna variazione sono considerati sotto controllo.

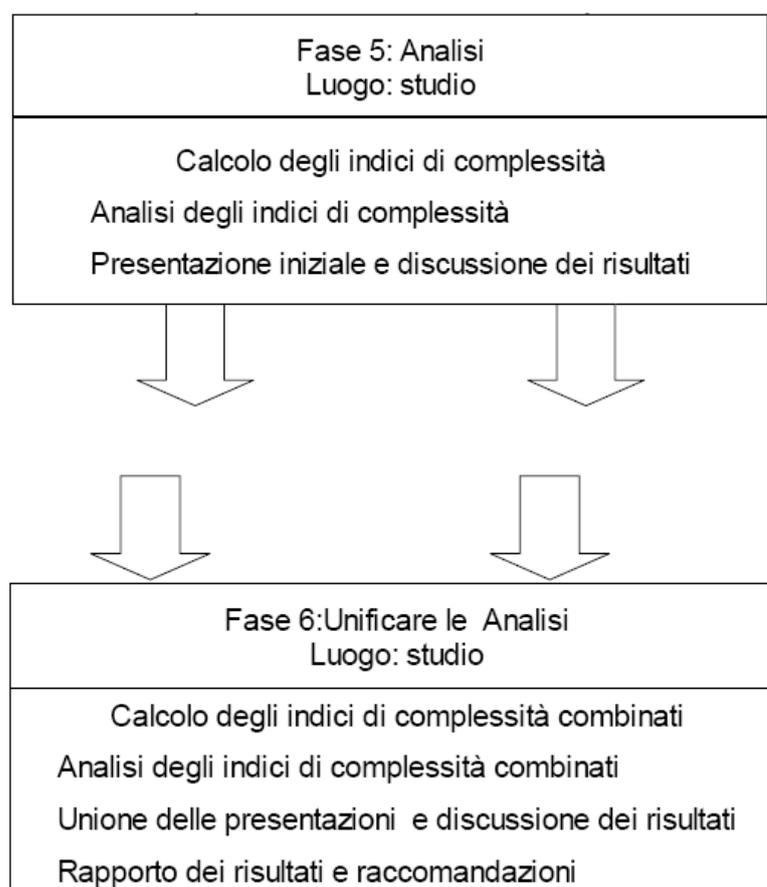


Fig. 7.5.7 Metodologia proposta per la misura di complessità [107]

Fase 4 : acquisizione dati

Il periodo di acquisizione dati deve essere lungo abbastanza per avere un adeguato quadro del comportamento del sistema, e dipende da:

- dettagli di indagine
- dimensione dell'impianto considerato
- numero dei flussi tracciati
- ammontare delle risorse disponibili.

Normalmente un periodo di due settimane dovrebbe essere sufficiente allo scopo. Il numero dei dati selezionati varierà in funzione del tipo di impresa, flussi considerati e livello di dettaglio dello studio. Un tipico esempio dei dati raccolti nella relazione coi fornitori è dato dal seguente schema.

Fasi 5 e 6: analisi dei dati

L'analisi dei dati è data dal raffronto fra $OCI (S^{NC})$ e $OCI (S^{INC})$ nelle varie aree di interesse. L'analisi può essere convalidata dall'esperienza acquisita nelle fasi 2 e 4. I calcoli vengono eseguiti in due fasi. La procedura generica per l'analisi dei dati è:

- si definiscono una serie di stati e si ordinano e si raggruppano secondo le variazioni
- il numero di variazioni delle classi di dati raccolti che identificano ogni stato viene registrato in una colonna delle variazioni
- vengono quindi calcolati $OCI (S^{NC})$ e $OCI (S^{INC})$
- si raffrontano gli indici attraverso le variazioni indicanti la natura e la severità del punto di complessità.
- le analisi dei dati portano ad una misura quantitativa della dinamica e della natura della complessità operativa di un sistema fornitore-cliente nei termini di:
 - importazione ed esportazione della complessità operativa attraverso le interfacce dell'organizzazione
 - assorbimento e generazione di complessità operativa all'interno dell'organizzazione: risulta spesso che la complessità è massima fra consegna e ordine, questo perché il sistema è sotto controllo per la metà del tempo, i dati dimostrano che in questo caso è maggiore la complessità esportata al fornitore tramite incertezza delle previsioni e dell'ordine di quanto se ne importi tramite ritardi di consegna. La differenza dà una misura della capacità del fornitore di assorbire complessità.
 - identificazione della sorgente di complessità operativa analizzando i dati riferiti alle motivazioni registrate
 - conduzione di un'analisi della complessità operativa interna a diversi livelli di dettaglio, ad esempio tipo di prodotto o di linea
 - priorità dei punti di complessità.

Considerazioni sulla metodologia di Sivadasan, Efstathiou, Frizelle, Shirazi, Calinescu

Sebbene la metodologia sopraelencata si riferisca solo all'ambito della catena di fornitura e quindi ai rapporti interni ed esterni dell'azienda con i fornitori e i clienti, gli autori non entrano nel

dettaglio di un'applicazione vera e propria della formula entropica. Le suddette linee guida risultano essere appositamente generiche per potersi adattare ad ogni contesto aziendale. La sequenza di fasi descritta è particolarmente interessante qualora si voglia utilizzare l'intervista come metodo di raccolta dati, per realizzare tale raccolta nel modo più efficace.

Alcuni di questi autori hanno successivamente presentato un ulteriore approfondimento dell'utilizzo della funzione entropica nel calcolo della complessità di vari aspetti dell'impresa. In particolare il professor J. Eifstathiou dell'Oxford University ha collaborato negli ultimi tre anni ad applicazioni della complessità operativa di Frizelle nella catena di fornitura, nelle celle di riparazione (di una linea di produzione), e dei sistemi di personalizzazione di massa come risulta di seguito [108].

Un'altra possibilità di integrare diverse metodologie di misura della complessità è il metodo ibrido che combina un sistema esperto con la funzione entropia come di seguito proposto.

Metodi 3 (sistema esperto) – 4 (modello entropico)

Nel 2002 *Janet Efstathiou, Ani Calinescu, Guy Blackburn* [108] definiscono tre tipi di complessità di un sistema manifatturiero a stazioni multiple:

1. *Complessità strutturale* (ripreso da Frizelle, Woodcock): quantità di informazione necessaria per descrivere lo stato programmato di una struttura produttiva

$$S = - \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{S_j} p_{ij} \log_2 p_{ij} \quad 7.5.1$$

dove:

P_{ij} è la probabilità che la risorsa j sia nello stato programmato i

S_j è il numero di stati programmati per la risorsa j

M è il numero di risorse (macchine o centri di lavoro).

Dall'equazione 7.5.1 si evince che una struttura produttiva che opera in modo flessibile con molte lavorazioni e macchine ha una elevata complessità strutturale, una struttura organizzata per moduli ha una più bassa complessità strutturale.

2. *Complessità dinamica*, definita in modo simile a quella strutturale (statica) ma in cui le probabilità sono stimate a partire da osservazioni reali:

$$D = - \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{S_j} p_{ij}^t \log_2 p_{ij}^t$$

dove:

P'_{ij} è la probabilità che la risorsa j sia nello stato i , stimata in base ai dati rilevati piuttosto che a quelli programmati.

3. Dal punto di vista della pianificazione del processo produttivo, si definisce la *complessità di presa di decisioni* (decision making complexity) che integra dimensioni fondamentali del mondo manifatturiero, inclusi dimensioni, varietà, concorrenza, obiettivi, informazione, costo e valore:

$$DM = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{S_i-1} \sum_{l=1}^n \bar{\pi}_{i,j,k,l} \log \bar{\pi}_{i,j,k,l}$$

dove:

m rappresenta il numero totale di operazioni associate con un mix di parti

n rappresenta il numero di parti che sono prodotte contemporaneamente nel sistema manifatturiero

r rappresenta il numero totale di risorse associate con un dato set di parti

$\bar{\pi}_{i,j,k,l}$ rappresenta il set normalizzato di requisiti di processo i cui elementi si ricavano come funzioni di:

1. il mix di parti e le loro corrispondenti quantità di n parti che possono essere prodotte in contemporanea nel sistema produttivo
2. i requisiti operazionali per ogni parte, la dimensione del lotto, le risorse e la sequenza in cui sono richieste e il tempo di processo su ciascuna
3. il grado di interazione tra le parti che è la somiglianza tra sequenze e la condivisione di macchine tra quelle sequenze
4. l'affidabilità delle operazioni e delle risorse e la qualità di processo.

Questa misura della complessità di presa di decisioni soddisfa una serie di condizioni tra le quali:

- la complessità di presa di decisioni deve aumentare con il numero e tipi di parti e di operazioni richieste
- la complessità di presa di decisioni deve aumentare con la flessibilità della sequenza di produzione
- la complessità di presa di decisioni deve aumentare con la condivisione di risorse
- la complessità di presa di decisioni dipende dalla affidabilità della risorsa

- la complessità di presa di decisioni deve aumentare quando la dimensione del lotto aumenta, dato che devono essere prese più decisioni.

A partire da queste definizioni viene sviluppato un sistema esperto denominato *WEB_ACMO* (Assessment of Complexity of Manufacturing Organizations) che si propone due finalità: fornire uno strumento per permettere agli utilizzatori inesperti di accedere attraverso Internet al programma *DM_CMPLX*, un programma esterno scritto in C che consente il calcolo della complessità di presa di decisioni, e registrare con il permesso dell'utilizzatore i dati forniti che verranno utilizzati per un'azione di bench-marking. Cioè una volta che l'utilizzatore ha completato la consultazione e garantito il permesso per la registrazione dei suoi dati viene autorizzato a navigare e consultare i dati anonimi inseriti da altri utilizzatori per farsi una idea della complessità di differenti organizzazioni di diverse dimensioni e operanti in distinti settori. I dati in ingresso richiesti sono informazioni come: il numero e tipo di parti e di macchine, i tipi e sequenze di operazioni corrispondenti a ciascuna parte, l'affidabilità delle macchine e la qualità dei processi.

Il sistema fornisce il valore dell'indice di complessità di presa di decisioni e alcune raccomandazioni come la riduzione del numero di prodotti, del numero di alternative di lavorazione, la riprogettazione sulla base di una struttura modulare, il miglioramento della qualità e affidabilità del processo.

Considerazioni sul metodo di Janet Efstathiou, Ani Calinescu, Guy Blackburn

L'idea di coniugare sistemi esperti ed entropia è brillante ed originale ma come tutti i sistemi esperti proposti per il calcolo della complessità non ha incontrato particolare seguito e successo a livello industriale. Anche questo lavoro suggerisce la distinzione di diversi tipi di complessità in base agli aspetti sui quali ci si focalizza. Il sistema ibrido che utilizza un sistema esperto pur basandosi sulla funzione entropica potrebbe costituire un interessante strumento al fine del calcolo dell'indice di complessità nell'ambito di metodologie di progettazione e produzione intergrate quali la concurrent engineering.

Nel 2006 *Andreas Größler, André Gröbner e Peter Milling* [109] distinguono tra complessità interna ed esterna di un sistema produttivo, correlando la adattabilità del sistema all'aumento di complessità dell'ambiente esterno. Al fine di misurare la variabili attraverso le

quali definire la complessità vengono rilevati dei dati direttamente sul sistema produttivo e contemporaneamente vengono somministrati dei questionari ai responsabili della produzione. Le interviste vengono condotte in 357 aziende divise in due gruppi, uno riferito ad un contesto di alta complessità ed uno di bassa complessità. I fattori vengono misurati sulla base di una scala Likert da 1 a 5 e la loro affidabilità testata tramite il fattore Alpha di Cronbach (vedi allegato G).

Una rapida sintesi delle variabili considerate essenziali per la valutazione della complessità nel presente metodo è data dalla seguente tabella:

Complessità interna	Configurazione di processo	<ul style="list-style-type: none"> ● Numero di tipi di processo ● Concentrazione di tipi di processo ● Co-penetrazione degli ordini ● Layout del processo
	Prodotti	<ul style="list-style-type: none"> ● Ampiezza del prodotto ● Requisiti/specifiche ● Periodo di vita del prodotto
Complessità esterna	Clienti	<ul style="list-style-type: none"> ● Numero di clienti ● eterogeneità del cliente base ● Requisiti JIT ● Potere contrattuale del cliente

Tab.7.5.1 Variabili che caratterizzano complessità interna ed esterna ad un sistema produttivo [109]

La *complessità interna* viene pertanto correlata a:

- configurazione del processo

- prodotti

e inoltre a:

- tecnologia

- struttura organizzativa.

Viene analizzata la prima dimensione, quindi a partire dal rilevamento tramite questionario, si misurano i seguenti fattori relativi alla configurazione di processo:

- numero di differenti layout di processo
- grado di concentrazione su layout specifici di processo (job shop, produzione di linea o di cellula)
- numero di differenti dimensioni di lotto impiegate in produzione
- concentrazione delle dimensioni di lotto
- profondità del punto di penetrazione dell'ordine.

La *complessità esterna* viene definita a partire da:

- prodotti
- clienti

e inoltre a:

- logistica

Vengono analizzati i primi due aspetti misurando i seguenti fattori relativi a prodotti e clienti:

- ampiezza di programmazione dei prodotti
- requisiti/specifiche
- lunghezza del ciclo di vita del prodotto
- numero di clienti
- eterogeneità della base dei clienti
- requisiti Just In Time
- potere contrattuale dei clienti.

Gli autori considerano la possibilità di influenze bidirezionali fra sistema ed ambiente, e di conseguenza la possibilità del sistema di assorbire la complessità proveniente dall'ambiente o viceversa. La variabilità dell'ambiente implica quindi la necessità di variazioni comportamentali o strutturali del sistema per adeguarsi, o viceversa decisioni aziendali che possono riferirsi alla scelta dell'ambiente in cui operare sulla base delle risorse presenti, o ancora tentativi dell'azienda, tramite apposite strategie di marketing, di modificare l'ambiente rendendolo più stabile. Allo stesso modo il confine fra ambiente e sistema può essere ridefinito dalla direzione aziendale tramite politiche di outsourcing, partnership, fusioni o cessioni.

Quando la complessità esterna aumenta vi sono tre possibili *reazioni da parte dell'impresa*:

- *Adattamento esplicito*. Quando viene rilevato l'incremento di complessità i principi base dell'azienda e la priorità degli obiettivi vengono ridefiniti tramite decisioni aziendali, ne deriva una ridefinizione della struttura organizzativa.
- *Adattamento implicito*. L'impresa è comunque dotata di una certa flessibilità interna. Operatori capaci all'occorrenza di variare le loro mansioni, rotazione dei manager, variazione della capacità produttiva e delle funzioni manageriali possono assorbire incrementi di complessità esterna senza la necessità di ridefinizione della pianificazione strategica.
- *Adattamenti espliciti combinati con adattamenti impliciti*, permettono di ridefinire l'ambiente in cui l'impresa opera, si pensi ad esempio ad una impresa automobilistica che sfrutta le competenze acquisite in un segmento per immettere sul mercato una linea di macchine appartenente ad un altro segmento, diversificando il rischio del primo.

Per un'analisi più dettagliata, la complessità interna e quella esterna possono essere limitate ad aspetti più specifici come ad esempio la complessità relativa alla configurazione di processo.

Sul fronte esterno si può invece considerare fonte primaria di complessità il cliente che, con le sue necessità è l'elemento chiave per la progettazione funzionale del prodotto. Il prodotto di conseguenza è l'elemento veicolante della complessità fra l'interno e l'esterno, pertanto sarà una componente fondamentale di ambedue le valutazioni.

Un'ultima fonte di complessità può essere inoltre considerata la logistica distributiva e di fornitura, e in effetti gran parte della complessità della configurazione del processo può derivare da ritardi o errori nelle forniture.

Conclusione del lavoro é che nelle imprese che operano in un ambiente di bassa complessità se la complessità esterna aumenta il sistema interno cambia implicitamente, essendo le risorse più limitate di quelle delle imprese con un livello di complessità più elevato. Nelle imprese invece che si trovano in un ambiente più complesso, gli aumenti di complessità esterna hanno come conseguenza un cambiamento degli obiettivi strategici dell'impresa e quindi un adattamento interno esplicito.

I risultati dell'indagine consentono inoltre di concludere che le fabbriche in un contesto di alta complessità hanno in media una complessità interna più alta di quelle che si trovano in un contesto di bassa complessità e che le aziende inserite in un ambiente di alta complessità in media intensificano gli sforzi per migliorare sulle tre dimensioni di obiettivo strategico: costo, qualità e flessibilità di più di quelle che si trovano in contesti di bassa complessità.

Considerazioni sul metodo di Größler, Gröbner e Milling

Punti di forza:

- utilizza molteplici dati del sistema sia analitici e oggettivi che punteggi attribuiti da intervista
- applicazione valida per diversi settori e prodotti
- facile applicazione
- costi e tempi ridotti

Punti di debolezza:

- non definisce un indice unico di complessità ma differenzia in due complessità: interna ed esterna
 - considera dati fortemente soggettivi.
-

Considerazioni finali sul metodo ibrido per il calcolo della complessità

Dall'esame delle metodologie ibride sopra riportate si conclude che quelle più diffuse consistono in una integrazione di interviste e modello entropico, e nella tripla integrazione di metodi di raccolta di dati oggettivi in azienda, di punteggi attribuiti in seguito a interviste e calcolo della funzione entropia come rappresentativa della complessità del sistema. Questo tipo di approccio è quello che verrà utilizzato anche dai Professori ElMaraghy e Urbanic nei loro molteplici studi sulla complessità tecnologica ai quali è dedicato il prossimo paragrafo e che verrà seguito nella elaborazione di un metodo originale proposto nel presente lavoro.

7.6 Il metodo ibrido dei Prof. ElMaraghy e Urbanic

Tra i metodi ibridi di misura della complessità è particolarmente interessante quello proposto dai Professori *Hoda Waguih e H ElMaraghy dell'Intelligent Manufacturing Systems Center dell'University of Windsor, Canada*, da anni impegnati nello studio della complessità nell'ambito della produzione industriale. Gli autori partono dalla considerazione che nell'industria manifatturiera è necessario ridurre la complessità e che per questo è fondamentale creare degli strumenti in grado innanzi tutto di misurarla.

La metodologia viene esposta in una serie di articoli, sulla base di un modello ibrido euristico - entropico, prendendo spunto dalle ricerche di Cooper [45], Frizelle [100], Guenov [125] e dal già citato teorema di Shannon. Il metodo si basa infatti da una parte su indici che forniscono una catalogazione dei requisiti funzionali del sistema e dall'altro sull'utilizzo della funzione entropia come misura della complessità (vedi allegato H). Gli indici sono sia oggettivi, rilevati sul sistema, sia soggettivi, assegnati tramite interviste, e consentono di definire lo stato del sistema secondo un approccio intuitivo e dipendente dallo stato temporaneo delle circostanze (approccio euristico).

La complessità viene definita su diversi *livelli*:

1. prodotto
2. processo
3. operativo (che include 1 e 2)
4. sistema manifatturiero

Il valore della complessità viene calcolato a tutti i livelli a partire principalmente da fattori rilevabili e quantificabili del prodotto, del processo e del sistema manifatturiero (approccio euristico) che vengono inseriti in una formula che determina una entropia (approccio entropico). La complessità di prodotto, di processo e quindi operativa comprendono anche dati elaborati a partire da interviste nel corso delle quali vengono attribuiti dei punteggi da operatori della produzione (componente soggettiva).

Il modello di complessità si distingue da quelli proposti da altri ricercatori, in quanto si basa su tre elementi, rifacendosi in parte alla funzione logaritmica della formula dell'entropia dell'informazione di Shannon: la *quantità totale di informazioni*, la *diversità o varietà delle*

informazioni e il contenuto di tali informazioni. Per contenuto si intende lo sforzo compiuto dagli operatori nello svolgere una mansione manifatturiera, cioè nel produrre le feature del prodotto e nel rispettare le specifiche di tali feature.

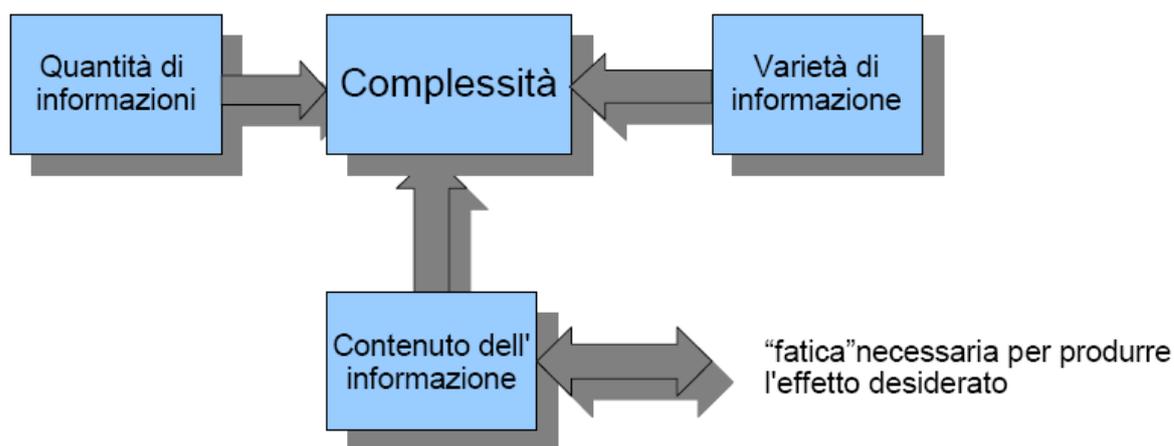


Fig. 7.6.1. Elementi della complessità [110]

Mentre la *complessità di prodotto* focalizza caratteristiche e specifiche del prodotto, la *complessità di processo*, oltre a includere quella di prodotto, focalizza gli strumenti, equipaggiamenti e operazioni usati per produrlo, limitandosi però alle macchine che processano direttamente il prodotto e non considerando buffer e dispositivi di movimentazione pur facenti parte dell'impianto manifatturiero. L'analisi di *complessità operativa* considera quindi lo sforzo cognitivo e fisico associati alle mansioni relative alla combinazione prodotto/processo, e infine la *complessità di sistema manifatturiero* si basa sulle stesse caratteristiche delle macchine, già usate per calcolare la complessità di processo, aggiungendo le complessità relative a buffer e movimentatori, attraverso un codice a partire suddiviso in tre corrispondenti parti a partire dal quale è possibile calcolare l'indice di complessità.

Di seguito vengono riportati e analizzati i contenuti più rilevanti degli articoli dove gli autori descrivono i metodi da loro proposti per il calcolo dei diversi tipi di complessità. La bibliografia dei Prof. ElMaraghy riguardante la complessità è abbastanza lunga, qui si sono selezionati gli articoli più significativi.

W.H. ElMaraghy, Urbanic R.J., 2003

“Modelling of manufacturing system complexity” [110]

Calcolo della complessità di prodotto e di processo – metodo ibrido

In questo primo articolo vengono presentate le metodologie di calcolo relative a complessità di prodotto e di processo.

I tipi di complessità legati alla produzione da considerare in un’azienda manifatturiera sono: la complessità di prodotto, la complessità di processo e la complessità operativa.

La *complessità di prodotto* è una funzione del materiale, delle informazioni derivanti dal disegno e delle specifiche speciali di ciascun componente facente parte il prodotto finale. Focalizza pertanto le caratteristiche e specifiche del prodotto.

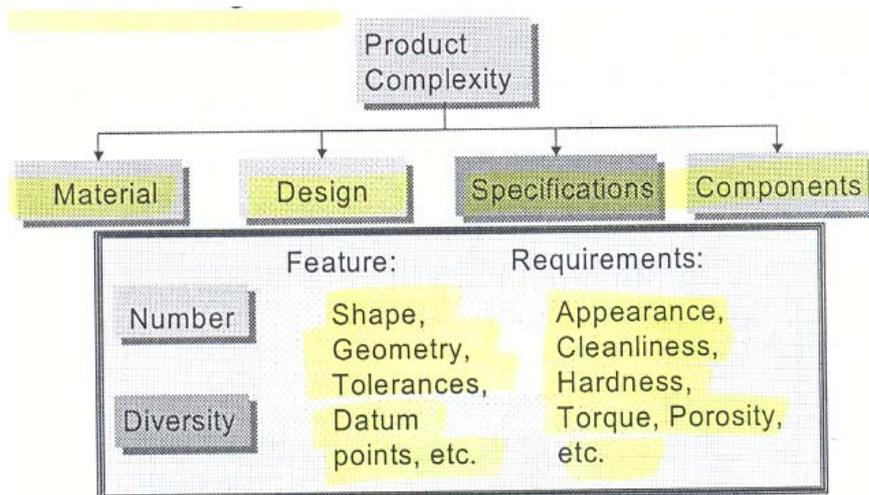


Fig. 7.6.2 Elementi della complessità di prodotto [110]

La *complessità di processo* è una funzione del prodotto, del volume di produzione richiesto e dell’ambiente di lavoro. L’ambiente di lavoro impone le decisioni di processo come tipo di equipaggiamento, fasi del processo, maschere, attrezzature, utensili, calibri da utilizzare durante il processo e così via. Focalizza pertanto gli strumenti, attrezzature e operazioni usate per la fabbricazione.

Al fine di realizzare il miglior progetto di prodotto per uno specifico ambiente, la funzione di ogni componente nel sistema deve essere bilanciata nell’interazione con gli altri componenti.

La complessità aumenta con

- (i) il numero e la diversità delle *feature* (caratteristiche) che devono essere fabbricate, assemblate e testate
- (ii) il numero, tipo e sforzo delle attività per produrre le *feature*.

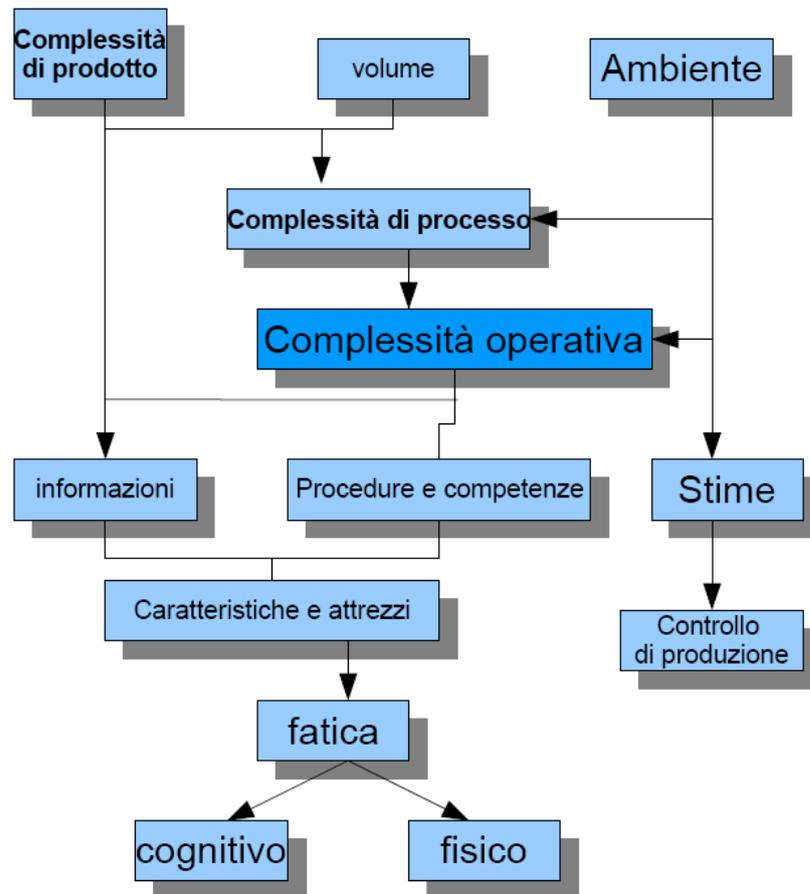


Fig. 7.6.3 visione di insieme della complessità manifatturiera [110]

In figura 7.6.3 è rappresentato un diagramma che correla la complessità di prodotto, a quella di processo e a quella operativa rappresentando le interazioni tra i diversi fattori del sistema che influiscono su di esse, quali ambiente, informazioni, controlli, sforzo ecc. e le relazioni che intercorrono tra di essi.

Viene proposto dagli autori un modello ibrido euristico-entropico composto da tre componenti di base della complessità: la quantità assoluta di informazione, la diversità di informazione e il contenuto di informazione.

Nel caso del prodotto:

- *Quantità di informazioni*: numero di feature
- *Varietà di informazione*: diversità di feature
- *Contenuto dell'informazione*: sforzo di fabbricazione delle feature e di rispetto delle specifiche che caratterizzano la feature.

La complessità risulta pertanto funzione del materiale, delle caratteristiche progettuali del prodotto e delle specifiche speciali di ciascuna feature del prodotto ed è associata con la comprensione e la gestione di un grande volume o quantità di informazioni, così come di una grande varietà di informazioni.

Viene definito un **indice di complessità di prodotto** $CI_{product}$ funzione di:

1. entropia di informazione del prodotto $H_{product}$ che indica la *quantità totale di informazione*
2. rapporto di diversità del prodotto $D_{Rproduct}$, rappresentativo della *diversità di informazione*
3. coefficiente di complessità di fabbricazione del prodotto $c_{j,product}$ che indica il *contenuto dell'informazione*

$$CI_{product} = (D_{Rproduct} + c_{j,product}) H_{product}$$

dove:

$$H = \log_2(N + 1)$$

é l'entropia di informazione in cui N è la quantità totale di informazione

$$D_{Rproduct} = \frac{n}{N}$$

é il rapporto tra la quantità di informazione unica e l'informazione totale in cui n è la quantità di informazione unica.

La diversità delle informazioni è data dall'insieme delle diverse informazioni che si possono avere sul pezzo prodotto (ad esempio angoli, centri, diametri ecc.); la quantità di informazioni è data invece dalla somma del numero di tutte le informazioni per ogni determinato tipo che descrivono i componenti del pezzo in questione (ad esempio il pezzo presenta venti angoli, cinque centri, due fori con un diametro di un certo valore, ecc.).

Per quanto riguarda la parte inerente al contenuto dell'informazione, ElMaraghy introduce una formula, partendo dall'idea che un prodotto è formato da una determinata quantità di caratteristiche (feature) che devono rispettare un certo numero di specifiche.

Una feature può essere definita come una caratteristica geometrica con un significato funzionale: esempi di feature sono dei fori, dei raggi di curvatura, degli spallamenti. Alcuni autori includono anche i materiali all'interno delle feature.

Il contenuto dell'informazione è riportato sotto forma di un coefficiente di complessità di fabbricazione del prodotto che tiene conto degli sforzi compiuti, a livello progettuale, per la fabbricazione e il relativo controllo, al fine di realizzare il prodotto finale con date caratteristiche. In questa fase vengono introdotti diversi aspetti per valutare gli sforzi compiuti per realizzare le varie feature e per mantenere le specifiche del pezzo.

$c_{j,product}$ è pertanto basato su principi generali di fabbricazione e indipendente dal tipo di processo o dal volume. Il suo valore cresce con lo sforzo richiesto per produrre il prodotto.

Occorre definire i fattori associati al prodotto come materiale e componenti e le feature e le specifiche richieste per ogni prodotto. In particolare esempi di caratteristiche di prodotto sono: forma, geometria, tolleranze, mentre esempi di specifiche sono: grado di finitura superficiale, durezza, pulizia, porosità ecc. Quindi le caratteristiche indicano come il pezzo è fatto dal punto di vista morfologico e le specifiche come deve essere lavorato.

$$c_{j,product} = \sum_{f=1}^F x_f * c_{f,feature}$$

é il coefficiente di complessità (sforzo) di fabbricazione del prodotto

in cui

x_f è la percentuale di diversità della feature x generica

$c_{f,feature}$ è il coefficiente di complessità relativo alle feature

Cioé mentre $x_{f,feature}$ dà una misura del numero di feature di un determinato tipo facenti parte del prodotto finale, $c_{f,feature}$ misura, per ogni feature presente nel prodotto finale, gli sforzi effettuati per fabbricare tale caratteristica.

$$c_{f,feature} = \frac{(F_N * F_{CF} + S_N * S_{CF})}{(F_N + S_N)}$$

in cui

F_N è la quantità numerica di feature

F_{CF} è il fattore di complessità (sforzo di fabbricazione) della singola feature

S_N è la quantità numerica di controlli delle specifiche

S_{CF} è il fattore di complessità (sforzo di rispetto) della singola specifica

$$F_{CF} = \frac{(\sum_{j=1}^J factor_level_j)}{J}$$

in cui

J è il numero degli aspetti secondo cui si valuta lo sforzo per produrre una caratteristica

$factor_level_j$ è il fattore di complessità (sforzo di fabbricazione della feature) per la j_{ma} categoria al quale gli operatori dell'azienda attribuiscono un valore pari a 0, a 0,5 o a 1 a seconda del livello di sforzo.

$$S_{CF} = \frac{\sum_{k=1}^K factor_level_k}{K}$$

in cui

S_{CF} è il fattore di complessità specifica

K è il numero dei controlli per verificare il rispetto delle specifiche

$factor_level_k$ è il fattore di complessità (sforzo di rispetto della specifica) per la k_{ma} specifica al quale gli operatori dell'azienda attribuiscono un valore da 0 a 1.

Il significato dei $factor_level$ è cruciale nella definizione e nel calcolo della complessità: per ogni feature vengono assegnati dei valori: ad un livello basso di sforzo si associa il valore 0, ad un

livello medio di sforzo si associa il valore 0,5 e ad un livello di sforzo alto si associa il valore massimo 1. Ad esempio se si fabbrica un foro e la tolleranza dimensionale è uno degli aspetti J, si associa uno dei tre valori citati al factor $level_j$ corrispondente, per definire quanto sia stato difficile nel processo di lavorazione rientrare nei parametri dettati dalla tolleranza richiesta, si assegnerà quindi 0 se la tolleranza è ampia, 0,5 per tolleranze intermedie e 1 per tolleranze ristrette. Si fa lo stesso per $factor_level_k$ supponendo che il controllo k sia che il foro non presenti un bordo tagliente, assoceremo 0, 0,5 o 1 a seconda della difficoltà incontrata nel rispettare questa specifica. In alternativa può essere utilizzata una scala di valori che va da 1 (minimo sforzo) a 10 (massimo sforzo) o anche scale diverse.

Si può inoltre notare come il numero degli aspetti di valutazione degli sforzi è lo stesso per ogni feature; invece per le specifiche ciò non avviene. Infatti ad ogni caratteristica del prodotto non sono associate necessariamente tutte le specifiche prese in considerazione nella matrice ma solo quelle necessarie, come si può vedere dal caso dei fori di montaggio della piastra, la cui unica specifica è relativa al controllo delle tolleranze.

$c_{j,product}$ può pertanto assumere valori da 0 a 1 e viene determinato attraverso un metodo matriciale, attribuendo i punteggi 0, 0,5 e 1 a tutti gli aspetti j e i controlli k per ciascuna feature. L'attribuzione dei punteggi fa comprendere che a seconda dell'ambiente lavorativo in cui viene realizzato il prodotto si ha una differente percezione di quanto sia complesso realizzare una determinata caratteristica: questo condiziona in modo soggettivo la valutazione di complessità. Del resto una delle tesi di partenza dello studio di ElMaraghy è proprio che le capacità umane nel processo manifatturiero all'interno dell'azienda influiscono direttamente sulla valutazione della complessità.

La metodologia per determinare l'indice di complessità del prodotto può pertanto essere riassunta nelle seguenti fasi:

1. definire prodotto e sistema e la scala di valutazione per il calcolo delle complessità/sforzi
2. determinare il numero totale N di informazioni, componenti, sub-componenti, del prodotto ecc. e calcolare l'entropia di informazione H
3. determinare la quantità specifica di ciascuna diversa feature definita nel punto 2 e sommarle per calcolare n e il rapporto di diversità di prodotto D_R
4. definire il numero e tipo dei J aspetti diversi con cui si valuta la fabbricazione delle feature (ad esempio forma, geometria, tolleranze) e i K aspetti con cui si valutano le

- specifiche associate alla fabbricazione delle feature (ad esempio la qualità superficiale del pezzo e quindi la rugosità richiesta)
5. generare la matrice delle caratteristiche $F \times J$ e delle specifiche $F \times K$ e assegnare i livelli di complessità appropriati a ciascuna cella della matrice
 6. calcolare il coefficiente di complessità di fabbricazione di prodotto $c_{j, \text{prodotto}}$ seguendo i passaggi indicati dalle formule
 7. calcolare l'indice di complessità di prodotto CI_{prodotto}

Al fine di una maggiore comprensione del modello gli autori riportano l'esempio di un filtro per il flusso d'aria.



Fig.7.6.4 Filtro dell'aria [110]

Per il quale sono forniti i valori

$$n = 66$$

$$N = 123$$

e di conseguenza il valore $D_{R, \text{prodotto}} = 0,54$

e l'entropia di informazione $H_{\text{prodotto}} = 6,95$.

Per calcolare il valore di $c_{j, \text{prodotto}}$ l'autore utilizza due tabelle: la prima è la matrice $F \times J$ che pone in relazione le F tipologie di feature ai J aspetti con i quali ne viene valutato lo sforzo di fabbricazione; la seconda è la matrice $F \times K$ che mette in relazione le F tipologie di feature ai K controlli di specifica delle feature stesse.

Osservando la prima tabella si può vedere come per ogni feature viene riportato il corrispondente sforzo di realizzazione in relazione al j -esimo aspetto: ad esempio, la geometria del foro del sensore richiede uno sforzo medio (0,5), il che vuole dire che è mediamente difficile fabbricare il foro nella posizione geometrica corretta.

Descrizione	J=4							
	numero	aspetti						
		forma	geometria	tolleranze	accumulo errori fabbricazione	somma	somma/J	
Foro sensore	1	0,5	0,5	0,5	0	1,5	0,38	
Foro pitot	1	0,5	0,5	1	0	2	0,50	
Fori di montaggio sensore	2	0,5	0	0	0,5	1	0,25	
Fori di montaggio piastra	2	0	0	0	0	0	0	
Superfici lavorate	2	0	0	0	0,5	0,5	0,13	

Tab.7.6.1 Matrice FXJ [110]

Descrizione	K=variabile							
	numero	aspetti						
		finitura superficiale	6H thread fit	no bordi taglienti	no discontinuità superficiali	somma	somma/K	
Foro sensore	1	0		1	0,5	1,5	0,50	
Foro pitot	1	0		1	0,5	2	0,50	
Fori di montaggio sensore	2		0			1	0,00	
Fori di montaggio piastra	2		0			0	0,00	
Superfici lavorate	2	0		0,5		0,5	0,25	

Tab.7.6.2 Matrice FXK [110]

Le celle vuote della seconda matrice stanno a indicare che non vengono richieste tutte le specifiche su tutte le feature, per esempio nel caso dei fori di montaggio della piastra, la unica specifica richiesta è il “6h thread fit” il cui rispetto è valutato facile (valore attribuito 0).

In entrambe le tabelle sono riportate sulle ultime due colonne la somma dei factor_level per ogni feature e il rapporto tra tale somma e il numero di aspetti di valutazione degli sforzi J nella prima matrice e del numero di specifiche K nella seconda.

Per ogni feature poi, vengono sommati i valori di SUM/J e SUM/K moltiplicati per il numero di features di quel tipo presenti nel prodotto finale; si divide poi il risultato di questa operazione per la somma del numero F_N di features di quella tipologia e del numero S_N di controlli delle specifiche subiti da tali feature. E' importante notare che secondo gli autori un controllo corrisponde in realtà alla verifica di diverse specifiche sulla stessa feature, quindi di fatto S_N coincide con F_N .

Infine si moltiplica questo valore per la percentuale di presenza nel prodotto finale della x -esima feature $x_{f,feature}$ (ad esempio ci sono due fori di montaggio della piastra nel pezzo finale rapportati al numero di feature totali nel pezzo, che sono otto, come si evince dalla somma dei valori della colonna numero della prima matrice, e dunque la percentuale di presenza di tale feature nel prodotto finale è data dal rapporto $2/8$) e si somma il valore così trovato agli altri ottenuti mediante il medesimo procedimento.

La tabella seguente riporta i valori della complessità delle singole feature considerando sia gli sforzi effettuati per eseguirle, sia gli sforzi di rispetto delle varie specifiche; nell'altra colonna sono invece riportati i valori pesati della complessità per ogni feature in relazione al numero totale di feature presenti nel prodotto finale.

	Complessità feature	Complessità feature pesata
Foro sensore	0,44	0,05
Foro pitot	0,50	0,07
Fori di montaggio sensore	0,13	0,04
Fori di montaggio piastra	0,00	0,00
Superfici lavorate	0,19	0,13
Complessità di fabbricazione del prodotto c_j		0,29

Tab.7.6.3 calcolo del coefficiente di fabbricazione del prodotto c_j [110]

La somma di tutti i valori nella seconda colonna dà come risultato il valore del coefficiente di complessità relativa del prodotto, che va quindi inserito nella formula dell'indice di complessità del prodotto.

$$CI_{product} = (D_{Rproduct} + c_{j,product}) \times H_{product} = (0,54 + 0,29) \times 6,95$$

$$CI_{product} = 5,77$$

E' interessante notare che rendendo comune la geometria del foro filettato ed eliminando la specifica di finitura superficiale per il foro del sensore, l'indice di complessità del prodotto si riduce a:

$$CI_{product} = (D_{Rproduct} c_{j,product}) \times H_{product} = (0,51 + 0,28) \times 6,94$$

$$CI_{product} = 5,48$$

il che costituisce una verifica della validità del modello.

Al fine di rendere ancora più chiara la metodologia dei Prof. ElMaraghy e Urbanic si riporta in allegato F il calcolo dell'indice di complessità di prodotto di due semplici pezzi meccanici a confronto.

La complessità di processo è una funzione del progetto del prodotto, dei requisiti di volume, dell'orizzonte di programmazione e dell'ambiente di lavoro.

Per generare l'indice PI di complessità di processo occorre individuare i principali costituenti il processo di fabbricazione. Gli esempi portati si riferiscono alle lavorazioni con macchine, ma la struttura può essere applicata a qualsiasi ambiente.

La metodologia stabilita per generare una misura della complessità di prodotto può essere estesa per comprendere i molti aspetti della complessità di processo. La procedura per calcolare la complessità relativa per il prodotto è quindi la stessa che si usa per calcolare la complessità relativa del x_{mo} costituente individuale del processo.

Occorre definire i fattori associati con il processo come ambiente, prodotto e volume. In particolare esempi di aspetti di complessità di processo sono: attrezzatura, materiale, movimentazione, sistemi, utensili, apparecchi di misura, dispositivi di movimentazione, ecc. Come per il prodotto si tratterà di calcolare una complessità relativa all' x_{esimo} costituente individuale del processo.

L'indice di complessità di processo è quindi la somma della complessità dei costituenti individuali e della complessità di prodotto.

$$PI_{processo} = \sum PC_x + CI_{product}$$

dove

$$PC_N = (D_{Process,N} + c_{Process,N}) * H_{Process,N}$$

che contiene definizioni analoghe a quelle date per la complessità di prodotto.

Nel caso di asportazione di truciolo con linea dedicata le informazioni necessarie per stabilire la complessità del processo sono le seguenti:

- pallet
- gruppi
- utensili
- teste
- mandrini / viti guida
- dispositivi di misura
- postazioni
- attrezzaggi

Quindi si tratta di caratteristiche del processo e delle attrezzature di produzione.

La complessità di processo aumenta in particolare quando si utilizzano progetti non sperimentati e non standard, tipici del lancio di nuovi prodotti.

E' importante sottolineare come la complessità di processo comprenda anche quella di prodotto. In questo pertanto si differenzia da una complessità dell'impianto manifatturiero che tiene conto solamente delle caratteristiche statiche della macchine di produzione che verrà definita in successive pubblicazioni. Inoltre nella complessità di processo intervengono solamente le caratteristiche della macchina che lavora il pezzo (per esempio macchina utensile) mentre non vengono considerati altri componenti del sistema manifatturiero come buffer e movimentatori.

Riassumendo: viene descritto un modello di complessità e definiti un indice di complessità di prodotto e di processo, il primo è funzione di caratteristiche del prodotto quali numero dei componenti, materiali, geometrie, tolleranze, ecc. il secondo dipende da attrezzature, materiali, movimentazioni, utensili e tutto ciò che descrive il processo di produzione.

Entrambi gli indici sono pertanto funzione di: informazioni, caratteristiche e specifiche di prodotto e di processo.

L'indice di complessità di prodotto riflette visibilmente le influenze di: quantità e varietà di caratteristiche e tratti del prodotto. La complessità di prodotto interagisce con gli elementi della complessità di processo associati con i volumi di produzione, l'orizzonte di pianificazione e l'ambiente di fabbricazione. L'esempio fornito (un componente per il passaggio di flusso di aria) indica le caratteristiche che hanno la maggior influenza sulla complessità di prodotto e di processo.

Questa struttura di calcolo della complessità può essere usata in qualsiasi ambiente di progetto e fabbricazione usando una selezione appropriata degli aspetti che influiscono sul prodotto principale e dei costituenti il processo. L'intenzione è di sviluppare uno strumento che aiuti a identificare aree di complessità che possano essere semplificate.

Considerazioni sulla metodologia proposta da W.H. ElMaraghy, nel 2003

La complessità calcolata da ElMaraghy mantiene in parte la forma logaritmica della funzione di Shannon e ne conserva il nome di entropia, ma si allontana significativamente dall'essenza dei metodi entropici di misura della complessità proposti da precedenti autori.

La componente euristica determinata anche tramite interviste porta pertanto a classificare il metodo come ibrido, pur utilizzando una misura di tipo logaritmico della funzione entropia. Si può pertanto considerare il *metodo ibrido tra le metodologie 2 e 4* delle categorie precedentemente esposte.

I limiti principali del metodo di ElMaraghy e Urbanic sono:

1. La valutazione soggettiva degli sforzi di realizzazione delle features e di rispetto delle specifiche non dà un valore scientificamente oggettivo al risultato finale, che dipende in sostanza da come sono stati valutati tali sforzi.
E' anche vero che uno degli obiettivi della loro ricerca è proprio la comprensione degli effetti del lavoro umano nella fabbricazione di un prodotto.
2. I controlli riferiti a diverse specifiche su una stessa feature vengono di fatto calcolati come uno, cioè un controllo corrisponde in realtà alla verifica di diverse specifiche sulla stessa feature, quindi di fatto SN viene fatto coincidere con FN.
3. Non viene messa in risalto l'incidenza del materiale, probabilmente considerato all'interno dei punteggi attribuiti nelle matrici

4. La metodologia è principalmente riferita a prodotti ottenuti tramite asportazione di truciolo, anche se gli autori sottolineano che la metodologia è applicabile a qualsiasi tipo di lavorazione. Comunque la complessità del componente semilavorato di origine, ottenuto per fusione, estrusione o altro processo, viene trascurata, limitandosi a considerare la fase dell'asportazione di truciolo.
 5. Non viene fornito un range di valutazione dei valori di complessità utile ad effettuare stime e comparazioni.
 6. L'indice di complessità calcolato si riferisce ad un prodotto non assemblato, tutto il metodo è basato sull'idea che ci si riferisca ad un singolo componente, trascurando la complessità di assemblaggio.
-

ElMaraghy W.H., Urbanic R.J., 2004

“Assessment of manufacturing operational complexity” [111]

Calcolo della complessità operativa – metodo ibrido

In questo articolo viene definita una *complessità operativa* che è una funzione del prodotto, del processo e della logistica di produzione. La misura della prestazione, la pianificazione del processo, l'installazione delle attrezzature, il funzionamento, il monitoraggio e la manutenzione sono tutte componenti della struttura della complessità operativa.

Complessità operativa di fabbricazione

Il modello generale di complessità proposto nell'articolo precedente viene esteso alla complessità operativa, che influisce direttamente sulla usabilità del prodotto ed è importante per i risultati in termini di qualità di prodotto e di processo. La complessità di fabbricazione cresce con:

- (i) il numero e la diversità delle caratteristiche da fabbricare, assemblare e testare
- (ii), il numero, tipo e impegno dei lavori per produrre le caratteristiche.

Come già visto la complessità dipende da tre fattori: quantità assoluta di informazioni, diversità di informazioni e contenuto dell'informazione.

Sebbene la complessità associata con il prodotto, processo e operativa siano tutte correlate, questi elementi possono essere disaccoppiati e ricollegati in modo sistematico. La complessità di

prodotto è una funzione del materiale, del progetto e delle specifiche speciali di ogni componente all'interno del prodotto. La complessità di processo è una funzione del prodotto, dei requisiti di volume, e dell'ambiente di lavoro.

La **complessità operativa** è una funzione del prodotto, processo, relative attività e logistica di produzione che considera lo sforzo cognitivo e fisico associato con le mansioni relative alla combinazione prodotto/processo. Le informazioni e le abilità richieste per svolgere le attività sono entrambe relative al prodotto (il focus è sugli aspetti legati alla qualità) o relativi al processo (il focus è sulle lavorazioni di macchina, volume di produzione o efficienza). Le attività relative al prodotto corrispondono direttamente all'in-process o ai requisiti del prodotto finale: calibratura, cambio degli utensili e sistemazione delle attrezzature per propositi di qualità. Le attività relative al processo corrispondono alla fabbricazione: installazioni relative al processo, pre-assemblaggi, messa in funzione delle apparecchiature, meccanismi di chiusura di sicurezza adatti all'attrezzatura, analisi di guasto di processo e movimentazione del materiale.

L'**indice di complessità operativa** viene misurato a partire da variabili analoghe a quelle che compaiono negli indici di complessità di prodotto e di processo, in più vengono introdotti i coefficienti di complessità operativa di prodotto e di processo che sono definiti in funzione delle caratteristiche dei compiti e dello sforzo.

Indice di complessità operativa:

$$OI = (D_{Rep,product} + c_{o,product}) * H_{op,product} + (D_{Rep,process} + c_{o,process}) * H_{op,process}$$

in cui

$$H_{op,y} = \log_2(N_{op,y} + 1)$$

in cui

$N_{op,y}$ è la quantità totale di informazioni relative ai prodotti e ai processi

$$D_{Rep,y} = \frac{n_{op,y}}{N_{op,y}}$$

che misura la unicità di ciascun componente

in cui

$n_{op,y}$ è la quantità di informazione unica quindi indica il numero di tipi di informazione

c_j è il coefficiente che indica il contenuto dell'informazione precedentemente introdotto

il pedice y può assumere i valori prodotto o processo.

Abilità, **sforzo** e complessità sono correlati ma non equivalenti. Una mansione complessa può essere divisa in più semplici mansioni (senza sforzo), di conseguenza lo sforzo può essere considerato come un sottoinsieme della complessità.

Un semplice esempio spiega la non equivalenza di sforzo e complessità: consideriamo un componente con quattro fori filettati. Per ogni foro la profondità, diametro e profondità dello smusso devono essere misurati per determinare se stanno dentro le specifiche. Ci sono due modi: usare un calibro o un tampone. L'uso di un tampone consente a una persona anche non specializzata di verificare velocemente le caratteristiche del foro, quindi con poco sforzo. L'uso di un calibro richiede competenze più elevate e quindi sforzo maggiore. Notare che c'è però una penalizzazione di costo usando il tampone, infatti il più semplice tampone costa approssimativamente due volte il calibro standard ed è utilizzabile per una sola caratteristica.

Il processo di riduzione della complessità in elementi semplici è la base per i sistemi di fabbricazione dedicati, ma questo implica una perdita in termini di costo e informazione. Allo stesso modo un compito facile non deve essere considerato complesso se l'operatore non possiede le abilità o esperienza per essere in grado di svolgere il compito efficacemente, il compito rimane semplice, ma richiede molto più sforzo individuale da parte dell'operatore. Quindi lo sforzo può essere considerato una funzione del lavoro fisico e cognitivo. Viene svolta una analisi di sforzo che considera gli elementi fisici e cognitivi come un sottoinsieme del coefficiente di complessità operativa, quindi viene inserito lo sforzo nella definizione di indice di complessità operativa. Tale indice ci consente quindi di quantificare l'intervento umano nella fabbricazione del prodotto, ed è pertanto utile nella comprensione di quale forza lavoro debba essere utilizzata per determinate produzioni.

$$c_{o,product} = \sum_{f=1}^{F_{PD}} x_{pd,f} * P d_D$$

$$C_{o,process} = \sum_{f=1}^{FPC} x_{pd,f} * P_{CD}$$

$x_{pd,f}$ è la percentuale della x_{ma} caratteristica dissimile usata nell'analisi

P_{D} è il fattore di complessità della mansione sul prodotto

$x_{pc,f}$ è la percentuale della caratteristica x_{ma} dissimile per le mansioni relative al processo

P_{CD} è il fattore di complessità di processo

$$P_{dD} = \frac{\sum_{f=1}^J e_{fj}}{J}$$

in cui

J è il numero di mansioni relative al prodotto

e_{fj} è il fattore di sforzo e_f per la mansione sul prodotto j_{ma} come definita dallo sforzo relativo

$$P_{cD} = \sum_{k=1}^K \frac{e_{fk}}{K}$$

in cui

K è il numero di mansioni relative al processo

e_{fk} è il fattore di sforzo e_f per la mansione di processo k_{ma} come definita dallo sforzo relativo

Per mansione sul prodotto si intende per ex. montaggio utensili, cambio utensili, collocazione dispositivi di misura ecc.

per mansione di processo si intende per ex. messa in funzione delle stazioni, aggiustamenti meccanici ecc.

$$e_f = \frac{P_N P_D + C_N C_D}{P_N + C_N}$$

in cui

P_N è la quantità di mansioni fisiche

P_D è il fattore di sforzo fisico

C_N è la quantità di mansioni cognitive

C_D è il fattore di sforzo cognitivo

$$F_D = \frac{\sum_{m=1}^M \text{factor_level}_m}{M}$$

in cui

M è il numero di componenti fisici

factor_level_m è il fattore per la caratteristica m_{ma}

$$C_D = \frac{(\sum_{n=1}^N \text{factor_level}_n^t)}{N}$$

in cui

N è il numero di mansioni cognitive

factor_level_n è il fattore per la caratteristica n_{ma}

per mansione fisica si intende per ex. forza, destrezza ecc.

per mansione cognitiva si intende per ex. procedura, prestazione ecc.

Pertanto i fattori di sforzo si calcolano facendo la media dei fattori di fatica per ogni compito, questi ultimi calcolati tramite una scala complementare a D che va da 0 a 1.

Analogamente a quanto visto per il prodotto la *metodologia per determinare il coefficiente di complessità operativa a partire dagli sforzi* è la seguente:

1. definire la scala di valutazione che riflette le condizioni di lavoro (ex. livello di disagio nullo/moderato/elevato che corrispondono rispettivamente a 0, 0.5 e 1), questi valori vengono attribuiti in modo soggettivo attraverso interviste al personale.
2. definire la scala di valutazione del livello di controllo per entrambi lavoro fisico e cognitivo, (ex. automatico, associativo e cosciente che corrispondono a 0, 0.5 e 1), questi valori vengono attribuiti in modo soggettivo attraverso interviste al personale.
3. definire le caratteristiche relative al prodotto F_{PD} , le mansioni relative al prodotto J, le caratteristiche relative al processo F_{PC} e le mansioni relative al processo K
4. determinare il numero di caratteristiche e mansioni definite nel punto 1
5. definire il tipo di aspetti fisici (M) e cognitivi (N)
6. generare le matrici $F_{PD} \times J$ e $F_{PC} \times K$ di prodotto e processo

7. generare le matrici $J \times M$ di sforzo fisico e $J \times N$ di sforzo cognitivo per l'analisi dello sforzo relativo al prodotto e assegnare il livello di sforzo appropriato ad ogni cella della matrice
8. generare le matrici $K \times M$ di sforzo fisico e $K \times N$ di sforzo cognitivo per l'analisi dello sforzo relativo al processo e assegnare il livello di sforzo appropriato ad ogni cella della matrice
9. calcolare il coefficiente di sforzo relativo e_f per ogni mansione
10. calcolare i coefficienti di complessità operativa $c_{o,product}$ e $c_{o,process}$ sostituendo i valori di e_f

Riassumendo: la complessità operativa deriva dalla complessità di prodotto e di processo. La misura di questa complessità viene trasformata in funzione dello sforzo relativo, sia fisico che cognitivo, introducendo l'aspetto della prestazione umana.

Considerazioni sulla metodologia proposta da W.H. ElMaraghy, nel 2004

Anche questo metodo può essere considerato un *metodo ibrido tra le metodologie 2 e 4* delle categorie precedentemente esposte.

Il concetto di complessità operativa non è nuovo, viene precedentemente introdotto da Frizelle [100] ma si può notare la sostanziale differenza fra i due approcci, nel caso di Frizelle infatti il calcolo dei due indici di complessità operativa (statica e dinamica) dipendeva esclusivamente dal tempo di permanenza di uno stato, non considerando il punto di vista soggettivo del personale. ElMaraghy e Urbanic invece, come già precedentemente evidenziato, considerano che la percezione di fatica possa essere un fattore soggettivo, valutabile tramite interviste al personale. Altra caratteristica importante del metodo è che è il primo a proporre una distinzione tra fatica fisica e cognitiva. Questo approccio non consente un facile confronto fra i dati di un'azienda e un'altra, è però molto efficace per analisi interne considerando come varia la complessità dentro l'azienda in funzione delle variazioni di prodotto, di processo e di ambiente.

H.A. ElMaraghy, O. Kuzgunkaya, R.J.Urbanic, 2005

“Manufacturing Systems Configuration Complexity” [112]

Calcolo della complessità strutturale di sistema di fabbricazione – metodo entropico

In questo articolo ElMaraghy & c. forniscono una valutazione della complessità di sistema manifatturiero, intesa come complessità strutturale statica indipendente dal tempo, proponendo in modo simile a quello già utilizzato nei due articoli precedenti, un approccio ibrido. Utilizza un modello puramente entropico e pertanto catalogabile nella categoria entropica 4 tra quelle proposte nel presente lavoro.

Propone quindi un secondo approccio alla complessità di sistema manifatturiero basandosi sulla probabilità di successo del sistema nel consegnare la produzione richiesta, come funzione della disponibilità dei suoi componenti nel produrre i volumi richiesti. I due approcci forniscono risultati simili confermando la validità delle due metodologie.

Complessità strutturale di sistema di fabbricazione

Siccome la complessità e offerta di prodotti aumenta, sono necessari strumenti per raggiungere flessibilità e adattabilità a livello di progettazione e fabbricazione di prodotto. Risulta una complessità dovuta all'aggiunta/rimozione di risorse di produzione (ex. attrezzature, materiali, persone ecc.) ai sistemi esistenti, e all'espansione del tempo di produzione attraverso l'uso di tempo extra, secondi e terzi turni, così come all'outsourcing. Può avvenire, in caso di ristrutturazioni periodiche, l'aggiunta di nuove linee di produzione o l'installazione di vere e proprie nuove intere strutture in caso di espansione e costruzione di nuove fabbriche. Il modello di complessità operativa di fabbricazione introdotto per i singoli prodotti parte, come visto nei precedenti articoli, da tre componenti di base, la quantità assoluta di informazione, la diversità dell'informazione e il contenuto di informazione e combinandoli con la relativa misura dello sforzo per raggiungere il risultato richiesto. La analisi di complessità di prodotto focalizza le caratteristiche e specifiche del prodotto mentre la analisi di complessità di processo focalizza gli strumenti, attrezzature e operazioni usati per fabbricarlo. L'analisi di complessità operativa considera quindi lo sforzo cognitivo e fisico associati ai compiti relativi alla combinazione prodotto/processo.

Per classificare e misurare la complessità indipendente dal tempo dei principali componenti dei sistemi di fabbricazione viene definito un nuovo sistema di codificazione. Questo può essere utile per confrontare iniziali alternative progettuali, opzioni di ri-progettazione o proposte per cambiamenti di funzionalità e capacità e scenari di riconfigurazione. I progettisti di sistema possono proporre diverse configurazioni che soddisfano le capacità richieste: 1) Risorse fisse (ex.

tipi di attrezzatura e capacità, schemi di controllo, e programmi) 2) Risorse variabili (ex. personale) così come il numero di queste risorse.

Per queste scelte esistono molte alternative con vari gradi di complessità e costi associati. Pertanto una misura anticipata della complessità del sistema può essere uno strumento di confronto e presa di decisioni.

Un sistema di fabbricazione consiste nelle seguenti principali classi che vengono catalogate dagli autori secondo un codice di complessità:

- 1) macchine che realizzano i vari processi di fabbricazione
- 2) buffer che funzionano come disaccoppiatori per assicurare un soddisfacente approvvigionamento di parti per la produzione continua
- 3) attrezzature per la movimentazione dei materiali per trasferire pezzi da una macchina all'altra
- 4) operatori per completare i compiti delle macchine e le operazioni di sistema/compiti di supervisione.

Il codice di complessità descrive il sistema in cifre corrispondenti a campi usate per rappresentare:

- tipi e strutture generali
- controlli
- programmazioni
- operazioni

Viene definito un **indice di complessità strutturale I_s** , che è la somma dei valori delle complessità delle singole attrezzature subcomponenti, ciascuno dei quali definito a sua volta con la stessa metodologia della complessità di prodotto e di processo, cioè a partire dalla misura della entropia di informazione H e dal rapporto di diversità D_R .

Per ogni struttura, controllo, etc. viene specificato il numero N dei componenti e gli n tipi di componenti diversi, da questi per ognuno si ricava l'entropia di informazione

$$H = \log_2(N + 1)$$

in cui N è la quantità totale di informazione misura della quantità di informazione necessaria alla catalogazione e

$$D_R = \frac{n}{N}$$

quindi la complessità relativa a un x-esimo componente del macchinario preso in considerazione sarebbe:

$$I_x = D_R H$$

e in tal caso l'indice di complessità strutturale:

$$I_S = \sum I_x$$

$$D_R = \frac{n}{N}$$

è il rapporto tra la quantità di informazione unica e l'informazione totale in cui n è la quantità di informazione unica

Le informazioni sono in questo caso costituite da:

- assi della macchina
- teste
- mandrini
- utensili
- attrezzaggi
- buffer

e tutte le altre caratteristiche della macchina/buffer/sistema di movimentazione del materiale che realizza il processo produttivo

La differenza rispetto alla complessità di processo, definita in precedenza, sta nel fatto che qui ci si riferisce solamente alla attrezzatura di produzione, non si considera la sua interazione con il prodotto. Si tratta quindi di una misura statica riferita unicamente all'impianto manifatturiero senza valutare che tipo di prodotto viene processato. Inoltre nella complessità di processo intervengono solamente le caratteristiche della macchina che lavora il pezzo (per esempio macchina utensile) mentre qui vengono considerati anche altri componenti del sistema manifatturiero come buffer e movimentatori.

Viene portato l'esempio della lavorazione a rimozione di materiale per un blocco di cilindri in ferro fuso. Per produrre 100 pezzi all'ora si possono utilizzare tre sistemi: 1) una linea di serie che utilizza frese dedicate 2) una operazione dedicata di brocciatura 3) un sistema parallelo che

utilizza macchine a controllo numerico a 4 assi. Queste tre configurazioni di sistema producono un prodotto equivalente, ma c'è una grande differenza nei singoli elementi di produzione e nella loro complessità (più alta per 1, più bassa per 3). L'indice di complessità sottolinea chiaramente l'influenza della presenza di componenti unici e componenti comuni. La complessità del sistema influenza la programmazione, controllo, addestramento, procedure operative, analisi dei guasti, acquisizione di ricambi, manutenzione e supporto. Quando il valore dell'indice tende a zero, la difficoltà di gestire quell'elemento si riduce.

Oltre a individuare un sistema produttivo che trasformi i requisiti commerciali in parametri del sistema di progettazione, c'è anche il bisogno che il sistema sia robusto e che la sua capacità pianificata possa soddisfare varie domande preventivate/obiettivi alle condizioni operative.

Un altro aspetto della complessità di sistema pertanto da considerare è la valutazione delle performance, ovvero la probabilità indicante la disponibilità delle attrezzature e il suo avvicinarsi alla distribuzione richiesta dal progetto o dalla programmazione.

Viene introdotto un **indice di complessità che deriva dalla disponibilità delle macchine/scorte/materiali e attrezzature**. Cioè viene valutato il corretto funzionamento delle macchine e dei loro moduli.

$$I_{A,M} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ij} \log_2 \left(\frac{1}{p_{ij}} \right)$$

dove

p_{ij} è la disponibilità della macchina X_{ij}

X_{ij} è il numero di macchine in fase i , configurazione j

N è il numero di macchine installate nella fase i

M è il numero di fasi nella configurazioni di sistema

$P_{ij} = [A^n]$

in cui

A è la disponibilità di un modulo del sistema, espressa come percentuale del tempo totale

n è il numero distinto di componenti.

Questa formulazione è applicabile oltre che alle macchine , ai buffer e alle altre parti del sistema.

Si assume che la macchina si guasta quando qualcuno dei suoi componenti si guasta, pertanto i componenti dal punto di vista del funzionamento vengono considerati in serie.

L'indice I_{A_M} applicato ai tre casi precedenti conferma i risultati ottenuti utilizzando l'indice precedentemente definito I_S . Infatti la brocciatrice è una sola macchina ma con molti componenti quindi è comunque più complessa della macchina a CNC caratterizzata da una sola linea in parallelo.

Riassumendo: il sistema di codificazione della complessità è stato introdotto per racchiudere la varietà e quantità di informazioni presenti in un sistema manifatturiero e nei suoi componenti. Classifica le macchine, le scorte e i sistemi di movimentazione dei materiali.

Un'altro approccio alla definizione della complessità viene fornito a partire dalla probabilità di successo del sistema nel realizzare la capacità di produzione desiderata, come funzione della disponibilità dei suoi moduli e nell'incontrare il volume di produzione stabilito come obiettivo preventivo. La variazione di tale probabilità fornisce una misura della complessità del sistema.

Sebbene le tecniche di analisi siano differenti nei due approcci considerati, i risultati sono simili. Queste valutazioni della complessità e le relative misure sono elementi da considerare nella progettazione di insieme del sistema, insieme ad altri importanti aspetti come costo e qualità. Sono entrambe utili nella fase iniziale della progettazione così come durante l'intero ciclo di vita del sistema.

Considerazioni sulla metodologia proposta da ElMaraghy & c. nel 2005

In questa metodologia puramente entropica, ElMaraghy riprende nella definizione di complessità di sistema manifatturiero gli stessi requisiti funzionali utilizzati da Suh [121] per le sue definizioni di complessità non dipendente dal tempo.

Nel terzo articolo, rispetto ai due precedenti, con la definizione dell'indice di complessità di sistema e dell'indice di disponibilità degli impianti, la metodologia recupera inoltre l'oggettività dei dati, non entrano in gioco infatti valori attribuiti da 0 a 1 come nei due articoli precedenti. Risulta pertanto possibile il confronto con altre aziende, in termini di valori oggettivi.

I tre articoli sopra riportati costituiscono la base della teoria dei Prof. ElMaraghy e Urbanic riguardante la misura della complessità in ambito produttivo. Sono seguite altre pubblicazioni che rappresentano per lo più approfondimenti riguardanti la complessità di sistema manifatturiero con metodo entropico, introdotta nel terzo articolo.

Nel **2006 Hoda A.ElMaraghy** in *"A complexity code for manufacturing systems"* [113] riprende i contenuti dell'articolo "Manufacturing Systems Configuration Complexity" e definisce un sistema di codifica per classificare i sistemi manifatturieri che consente di cogliere le caratteristiche delle varie componenti dell'attrezzatura e le relazioni tra loro all'interno del sistema, che contribuiscono alla complessità strutturale. Tale complessità è intrinseca alle macchine e pertanto statica cioè indipendente dal tempo. L'elemento di novità è la distinzione tra complessità del sistema e complessità di layout.

Il manufacturing system complexity code consiste di campi che rappresentano attrezzature, come le macchine, buffers e trasportatori, così come il loro layout. Ogni campo contiene una stringa di digit, il valore della quale dipende dal grado di complessità strutturale, di controllo, di programmazione e delle operazioni di queste entità. Il codice può essere assimilato ad un codice DNA per identificare le caratteristiche del sistema.

Le applicazioni del codice sono molteplici: progettazione del sistema manifatturiero, confronto e pianificazione, definizione della loro complessità, e valutazione delle alternative di riprogettazione. Il codice è di supporto soprattutto nelle prime fasi di progettazione del sistema, quando le alternative di macchinario e tecnologie possono essere considerate con una potenziale maggiore differenza di costo. Le potenziali implicazioni e applicazioni del codice sono analoghe a quelle del sistema di codifica utilizzato nella Group Technology per creare le famiglie e le relative celle di fabbricazione.

I progettisti dei sistemi manifatturieri possono scegliere tra diverse possibili configurazioni del sistema associate a diversi gradi di complessità e diversi costi.

Un sistema manifatturiero è costituito dalle seguenti principali classi di entità:

- macchine che realizzano i vari processi manifatturieri
- buffer che giocano da disaccoppiamenti per assicurare una soddisfacente fornitura di componenti per una produzione continua
- attrezzature di manipolazione del materiale per trasportare i pezzi tra le macchine

- operatori per integrare i compiti delle macchine, e per operazioni di sistema e mansioni di supervisione.

Il *codice di complessità del sistema* (SCC) è costituito da due codici: il *codice di complessità di layout* (LCC) e il *codice di complessità dell'attrezzatura* (ECC).

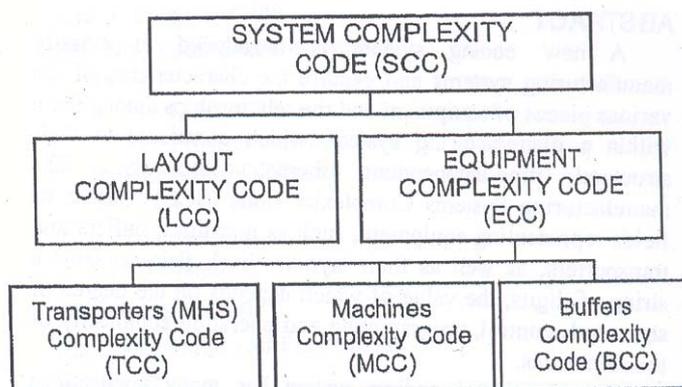


Fig.7.6.4 Il codice di complessità per i sistemi manifatturieri [113]

Il codice di complessità dell'attrezzatura consiste di tre campi per: 1) macchine, 2) buffer, 3) trasporti. Le cifre in ogni campo indicano 1) tipo e struttura generale, 2) controllo 3) programmazione e 4) operatività.

In modo analogo a quanto visto per le altre complessità (di prodotto e di processo) ci si basa sulle informazioni del sistema: in particolare N è il numero totale di sub componenti e n è il numero di sub componenti unici. Per esempio, in una macchina multi-mandrino, dove due mandrini sono identici e il terzo è differente, $N=3$ (numero totale dei mandrini) e $n=2$ (numero di tipi diversi di mandrini). Il valore di ogni cifra nelle stringhe di codice riflette il grado di complessità della feature che rappresenta, manifestato dalla quantità e varietà dell'informazione richiesta per usare, operare, programmare, controllare e interagire con essa. Più alto è il valore della cifra e più complicata è la feature corrispondente.

Questo codice comprende pertanto sia la quantità che la varietà della informazione e complessità intrinseche strutturali di tipiche parti singole di attrezzature di un sistema manifatturiero.

Il codice di complessità di layout rappresenta le caratteristiche indipendenti dal tempo del layout di un sistema manifatturiero, che influenza la sua complessità e operatività. Il codice consiste in quattro campi, come per l'ECC, e classifica le caratteristiche del layout del sistema manifatturiero in accordo con tipo, controllo, programmazione, e operatività. Il valore delle cifre

del codice indica il grado di complessità e l'ammontare e la varietà delle informazioni richieste per operare, controllare, programmare e mantenere il corrispondente componente.

Viene quindi definito un *Indice di Complessità basato sul codice* dato da:

$$I_p = (n/N) \log_2(N + 1)$$

In alternativa si possono aggregare i valori delle cifre del codice per fornire un indicatore combinato della complessità del layout di sistema.

Calcolando un indice per ciascuno dei quattro aspetti da considerare 1) tipo e struttura generale, 2) controllo 3) programmazione e 4) operatività, si ottiene un indice totale dato dalla somma degli altri indici.

ECC descrive i componenti individuali o moduli del sistema e LCC racchiude le relazioni tra i componenti del sistema. Si può pertanto concludere che SCC è per i sistemi manifatturieri quello che la Group Technology è per la classificazione e codifica dei prodotti.

Il codice di complessità di un sistema manifatturiero può essere un utile strumento nei primi stadi della progettazione di un sistema. Può essere usato per:

1. aiutare a semplificare, sveltire e standardizzare il progetto dei sistemi manifatturieri, anche attraverso il recupero di progetti simili
2. assegnare componenti/processi a macchine sulla base dei loro codici
3. re-indirizzare lavori ad altre macchine in caso di rotture
4. pianificare processi e selezionare macchine/utensili
5. fornire una misura della complessità del sistema da usare nella valutazione di alternative di riprogettazione del sistema e scambi
6. ridurre la complessità e quindi anche il costo dei componenti attraverso la riprogettazione del sistema
7. identificare aree con problemi potenziali di flusso e valutare proposte alternative
8. confrontare sistemi manifatturieri.

Nel 2006 *Ayman M.A.Youssef, Hoda A.E.IMaraghy* in “*Assessment of manufacturing systems reconfiguration smoothness*” [114] approfondiscono il tema della scelta della configurazione di un sistema manifatturiero ai fini della facilità di riconfigurazione dei processi,

gettando le basi della definizione di complessità di configurazione di un sistema manifatturiero. In questo articolo pertanto viene evidenziata una delle tante applicazioni pratiche che derivano da questi studi sulla complessità, che consiste nel supportare scelte strategiche in questo caso relative alla scelta del sistema manifatturiero più flessibile, cioè in grado di rispondere alle diverse domande del mercato.

Sempre nel 2006 viene pubblicato un altro più significativo articolo di **Onur Kuzgunkaya e Hoda A. ElMaraghy** “*Assessing the structural complexity of manufacturing systems configurations*” già citato nel capitolo sull’innovazione [43]. Anche questo lavoro è centrato sul tema della complessità di sistema manifatturiero dove alcuni esempi applicativi consentono la comprensione del codice di complessità di sistema sul quale si basa questa teoria.

Il codice include l’effetto di vari tipi di componenti e tecnologie usate in un sistema manifatturiero sulla complessità strutturale del sistema. La valutazione di tale complessità è importante ai fini di stabilire quale configurazione scegliere tra le alternative possibili per rispondere in modo efficace alle richieste variabili del mercato. I sistemi manifatturieri hanno visto infatti crescere la loro complessità anche a causa della flessibilità sempre più necessaria per mantenersi competitivi, occorre però cercare di trovare un giusto compromesso tra questi due aspetti apparentemente contrastanti.

Nel 1998 l’USA National Research Council ha identificato la produzione riconfigurabile come prima priorità tra le sei grandi sfide individuate per il futuro della produzione.

La riconfigurazione di un sistema manifatturiero si rende necessaria quando:

- cambia la domanda del prodotto
- vengono introdotti nuovi prodotti
- vengono integrate nuove tecnologie di processo nei sistemi manifatturieri esistenti

Scopo dell’articolo è misurare una complessità strutturale dei blocchi costituenti il sistema, macchine, dispositivi di movimentazione e buffers, indipendente dal tempo.

Nel progettare un sistema manifatturiero ci sono due fasi:

1. selezione del tipo, caratteristiche e numero di pezzi di attrezzatura che avranno differenti gradi di complessità basati sulla quantità di informazione richiesta per operare su di essi, programmarli e usarli. Questa è la fase statica strutturale di progetto in cui la complessità può essere da supporto nella scelta delle attrezzature.

2. la seconda fase prosegue nella progettazione di dettaglio del sistema, definendo il posizionamento delle attrezzature, il flusso del materiale e il comportamento dinamico del sistema nonché l'interazione tra i suoi moduli.

La complessità del sistema è dovuta all'incertezza del suo stato, dovuta a disturbi interni ed esterni, quali la rottura di un macchinario o la mancanza di WIP.

La complessità totale del sistema manifatturiero, definita in base alla usuale metodologia entropica, può essere ricondotta a tre complessità:

- numero, tipo e stato delle macchine
- numero, tipo e stato dei buffers
- numero, tipo e stato del sistema di movimentazione del materiale e dei suoi componenti

$$H_{RMS} = w_1 H_M + w_2 H_{Buffer} + w_3 H_{MHS}$$

dove

H_M rappresenta la complessità delle macchine di produzione

H_{Buffer} è la complessità dei buffer

H_{MHS} è la complessità del sistema di movimentazione del materiale

w_1 , w_2 e w_3 sono i pesi relativi degli elementi in genere considerati uguali

Complessità delle macchine:

$$H_M = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ij} a_{ij} \sum_{k=1}^2 p_{ijk} \log_2 \left(\frac{1}{p_{ijk}} \right)$$

dove

p_{ijk} = probabilità di stato della macchina alla fase i della configurazione j

a_{ij} = tipo di indice della macchina X_{ij}

X_{ij} = numero di macchine nello stage i alla configurazione di macchina j

N = numero massimo di moduli installati in una macchina

M = numero di stage in una configurazione di sistema

Si assume che ogni componente della macchina può trovarsi due stati: operativo o rottura.

Complessità del buffer:

$$H_{Buffer} = H_{B1} + H_{B2}$$

H_{B1} = stato del buffer se è vuoto o no

H_{B2} = assegnazione della variante di prodotto nel sistema

$$H_{B1} = \sum_{i=1}^{M-1} b_i \left(p_{ine} \log_2 \left(\frac{1}{p_{ine}} \right) + p_{ie} \log_2 \left(\frac{1}{p_{ie}} \right) \right)$$

dove

p_{ie} = probabilità della i_{esimo} buffer di essere vuoto

p_{ine} = probabilità dell' i_{esimo} buffer di non essere vuoto

b_i = indice del tipo di buffer

$M-1$ = numero di buffer = numero di stage - 1

$$H_{B2} = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^k p_{ij} \log_2 \left(\frac{1}{p_{ij}} \right)$$

dove

p_{ij} = probabilità dell' i_{esimo} buffer contenente la variante j

k = numero di varianti di prodotto

$M-1$ = numero di buffer

Complessità del sistema di movimentazione del materiale:

$$H_{MHS} = \sum_{t=1}^T m_t \sum_{k=1}^2 p_{tkMHS} \log_2 \left(\frac{1}{p_{tkMHS}} \right)$$

dove

p_{tkMHS} = affidabilità di MHS

m_t = indice del tipo di MHS

T = numero di trasportatori usati in MHS

k = stato del trasportatore t

il tipo e campo di struttura generale è convertito/aggregato in un numero singolo in base alla seguente formula:

$$a_{ij} = \frac{\sum_{d=1}^{ND} \frac{V_d}{MV_d}}{ND}$$

dove

d indica ogni cifra del codice

V_d = valore della cifra d

MV_d = massimo valore della cifra d

a_{ij} = indice tipo della macchina X_{ij}

ND = numero totale di cifre per il campo

L'indice tipo a_{ij} rappresenta la complessità relativa di una macchina confrontata con il tipo di macchina più complessa definito dal codice di rappresentazione proposto.

Di seguito si riporta un esempio di applicazione del metodo di codifica:

1 macchina con struttura fissa	60 utensili regolabili
4 assi di movimentazione	1 magazzino di utensili fissi
2 teste installate	4 attrezzaggi fissi
2 mandrini	0 attrezzaggi mobili
0 utensili fissi	0 buffer non integrati

Tab. 7.6.4 Configurazione 1 della macchina [43]

1	4	2	2	0	60	1	4	0	0
----------	----------	----------	----------	----------	-----------	----------	----------	----------	----------

Tab. 7.6.5 Stringa di codice della macchina [43]

$$a_{ij} = \frac{\left(\frac{1}{4} + \frac{4}{5} + \frac{2}{4} + \frac{2}{4} + \frac{0}{100} + \frac{60}{160} + \frac{1}{2} + \frac{4}{20} + \frac{0}{10} + \frac{0}{2}\right)}{10} = 0,31$$

4 macchina con componenti modulari espandibili	160 utensili regolabili
3 assi di movimentazione	1 magazzino di utensili fissi
1 testa installata	4 attrezzaggi fissi
4 mandrini modulari montati orizzontalmente con cambio utensile automatico	6 attrezzaggi mobili
4 utensili fissi	0 buffer non integrati

Tab. 7.6.6 Configurazione 1 della macchina [43]

4	3	1	4	20	160	1	4	6	0
----------	----------	----------	----------	-----------	------------	----------	----------	----------	----------

Tab. 7.6.7 Stringa di codice della macchina [43]

$$a_{ij} = \frac{\left(\frac{4}{4} + \frac{3}{5} + \frac{1}{4} + \frac{4}{4} + \frac{20}{100} + \frac{160}{160} + \frac{1}{2} + \frac{4}{20} + \frac{6}{10} + \frac{0}{2}\right)}{10} = 0,54$$

Confrontando i due risultati si verifica che all'aumentare della capacità della macchina aumenta il valore dell'indice tipo della macchina.

Il tipo di complessità delle due macchine sopra considerate è rispettivamente pari al 31% e al 54% in confronto alla macchina più complessa che può essere rappresentata con questo formato di codice.

La complessità aumenta al crescere delle probabilità che il sistema non funzioni, pertanto una macchina con 3 mandrini identici è meno complessa di una con 1 solo mandrino in quanto se uno dei tre mandrini si rompe la macchina può continuare la produzione mentre quella a 1 solo mandrino no.

Conclusioni sulle metodologie di ElMaraghy, Urbanic & c.:

La teoria di ElMaraghy & c. definisce 4 complessità:

- *Complessità di prodotto*
- *Complessità di processo*
- *Complessità operativa di fabbricazione*
- *Complessità di sistema manifatturiero*

tutte si basano sullo stesso principio di individuare le caratteristiche dell'oggetto e di valutare la complessità (sforzo) per fabbricarle/controllarle.

Complessità di prodotto

Informazioni:

- *Feature*: numero, tipologie
- *Specifiche delle feature*: indicazioni su come fabbricarle

Complessità:

- Sforzi di fabbricazione delle feature
- Sforzi di controllo delle specifiche

Risultato:

Indice entropico della complessità

Complessità di processo

complessità di prodotto + somma delle complessità dei singoli processi

Informazioni:

- *Caratteristiche della macchina*: mandrini, teste, utensili ecc. (non si considerano buffer e movimentatori ma solo la macchina che esegue la lavorazione)
- *Caratteristiche del processo*: mansioni per la realizzazione del processo: set-up, attrezzaggi ecc.

Complessità:

- Sforzi di realizzazione della macchina
- Sforzi di realizzazione del processo

Risultato:

Indice entropico della complessità

Complessità operativa di fabbricazione

complessità di prodotto + complessità di processo

(NB: la complessità di prodotto viene “contata 2 volte”)

Informazioni:

- *Caratteristiche della macchina:* mandrini, teste, utensili ecc.
- *Caratteristiche del processo:* mansioni per la realizzazione del processo: set-up, attrezzaggi ecc.

Complessità:

- Sforzi di realizzazione del prodotto e del processo

Risultato:

Indice entropico della complessità

Complessità di sistema manifatturiero

complessità di macchine + complessità di buffer + complessità di dispositivi per la movimentazione

Informazioni:

- *Caratteristiche della macchina:* mandrini, teste, utensili ecc.
- *Caratteristiche del buffer*
- *Caratteristiche del dispositivo per la movimentazione*

Risultato:

Indici ricavati da rappresentazioni a codici

Soggettività-oggettività misure

- Gli indici di complessità di prodotto, processo e operativa di fabbricazione implicano una valutazione soggettiva della complessità (sforzo) mediante l’attribuzione di punteggi
- L’indice di complessità di sistema manifatturiero è definito a partire da un codice dove intervengono solo dati oggettivi dei componenti del sistema.

L’obiettivo della teoria giustifica l’apparente contraddizione tra i due approcci soggettivo e oggettivo utilizzati: gli autori cercano una definizione di complessità tecnologica di prodotto che consenta un confronto con diversi livelli di complessità di sistema manifatturiero e per questo devono rendere indipendente la definizione di complessità di prodotto dalle

attrezzature produttive, evitando che queste influiscano sul valore dell'indice, il che creerebbe un legame che impedirebbe un reale confronto.

E' lo stesso approccio utilizzato con i sistemi esperti dove si cercava di confrontare su una scala di complessità tecnologica i diversi prodotti e rapportarli ai sistemi produttivi.

Nel presente lavoro si fornirà invece una definizione dell'indice totalmente oggettiva che però comprenderà necessariamente caratteristiche delle attrezzature di produzione e per questo motivo l'utilizzo dell'indice dovrà essere pertanto collocato in un ambito di concurrent engineering facendo parte dello stesso processo di sviluppo del prodotto.

8. LA COMPLESSITA' NELLE FASI DI PROGETTAZIONE E ASSEMBLAGGIO

8.1 Complessità nel design

Design in inglese significa *progettazione* ed è a questa fase dello sviluppo del prodotto che si può riferire una specifica complessità. E' possibile definire anche una complessità di *progetto* che propriamente comporta la considerazione di aspetti organizzativi e metodologici, quindi concettualmente distinta da quella di progettazione, in realtà molti degli autori considerati forniscono delle definizioni non così nettamente separate tenendo conto di aspetti aziendali che comunque influiscono sulla creazione e sviluppo del prodotto.

8.1.1 Definizioni e contributi vari

Un approfondimento a sé merita la complessità nella progettazione di prodotto (design), cioè nella *fase dello sviluppo del prodotto che precede la fabbricazione* o sarebbe meglio dire che è integrata con essa, in base ai principi della sempre più diffusa *ingegneria concorrente*. Il contributo più significativo in questo ambito è quello del Prof. Nam P. Suh al quale verrà dedicato il paragrafo 8.1.2 che, basandosi sulla teoria del Design Assiomatico da lui stesso proposta, introduce diversi tipi di complessità ricavando in ciascun caso suggerimenti utili ai fini del miglioramento del progetto.

La letteratura mostra che in ambito progettuale le definizioni di complessità sono in genere teoriche e concettuali, mentre le definizioni quantitative vengono fornite più spesso in ambito manifatturiero. Ciononostante le considerazioni sulla complessità di progettazione possono fornire preziosi suggerimenti in questa fase di sviluppo del prodotto e pertanto il concetto di complessità deve essere noto a qualsiasi progettista. Alcuni autori recentemente hanno proposto misure basate su indicatori (metodo 1), misure entropiche (metodo 4) e ibride (metodo 5) della complessità riferite alla fase di design del prodotto, fornendo pertanto una precisa quantificazione. Vengono di seguito riportati in ordine cronologico alcuni significativi contributi dai quali si evince che una corretta progettazione di prodotto non può prescindere da una corretta misura della complessità alla fine di ottimizzare le scelte progettuali fin dall'inizio dello sviluppo del prodotto stesso.

David Baccarini nel 1996 [115] è tra i primi a focalizzare l'attenzione sulla *complessità di progetto* definendola in modo qualitativo come consistente in molte differenti parti e quantificabile in termini di differenziazione e interdipendenza.

Per *differenziazione* si intende il numero di elementi diversi e per *interdipendenza* il grado di interrelazione o connettività tra questi elementi. Questa definizione può essere applicata a qualsiasi dimensione del progetto rilevante ai fini del processo di gestione del progetto stesso, come l'organizzazione, la tecnologia, l'ambiente, l'informazione, la presa di decisioni e i sistemi. Più nello specifico vengono definite:

- *complessità organizzativa*: presenta le due dimensioni sopra citate: la *differenziazione* definita in termini di differenziazione verticale riferita alla profondità della struttura gerarchica organizzativa e di differenziazione orizzontale riferita al numero di unità organizzative formali e alla divisione dei compiti in termini di lavoro e personale. La seconda dimensione è l'*interdipendenza* che si riferisce al grado di interdipendenza operativa e all'interazione tra gli elementi organizzativi del progetto.
- *complessità tecnologica*: per quanto riguarda la *differenziazione* viene riferita al numero e diversità di input e/o output, al numero di azioni e compiti separati per produrre il prodotto finito di un progetto e al numero di competenze coinvolte nel progetto, mentre in termini di *interdipendenza* si riferisce alle mansioni e al loro network, tra teams, tra tecnologie e tra input.

T.M. Williams nel 1999 [116] riprende alcune definizioni di Baccarini della *complessità di progetto* in termini di differenziazione e interdipendenza, affermando che questo tipo di complessità è correlata alla struttura che sta alla base del progetto. Per i progetti che comportano una progettazione e una manifattura, una causa maggiore della complessità di progetto è la complessità del prodotto, intesa come il numero di sottosistemi di un prodotto e le loro interrelazioni. Al fine di una quantificazione del concetto una volta individuati i sottosistemi vengono costruite delle matrici a impatto incrociato dove vengono indicate le probabilità p_{ij} che un cambiamento nel sottosistema i possa influire sul sottosistema j .

Le interrelazioni possono essere di due tipi:

- *complessità di prodotto sequenziale*: lunghezza di una sequenza di interazioni (se il sottosistema i influenza il sottosistema j che influisce sul sistema k , la lunghezza è 3)
- *complessità di prodotto di feedback*: la probabilità che un cambiamento nel sistema i possa influenzare il sistema i stesso.

Viene ripresa quindi la classica teoria di Thompson del 1967 [117] che definisce tre tipi di interdipendenze: *riunita* (ogni elemento dà un discreto contributo al progetto ma non influisce in modo significativo sugli altri elementi), *sequenziale* (gli output di un elemento diventano gli input di un altro elemento) e *reciproca* (ogni output di ogni elemento diventa l'input di un altro elemento). In base alla ricerca di Jones del 1993 [118] si aggiunge nella definizione di complessità un nuovo aspetto rispetto ai due già introdotti da Baccarini: la instabilità dei presupposti sui quali i compiti sono basati che aggiunge l'ulteriore elemento dell'incertezza.

Secondo Turner e Cochrane [119] i progetti possono essere classificati attraverso due parametri: quanto bene sono definiti gli obiettivi e quanto bene sono definiti i metodi per raggiungere questi obiettivi. I cambiamenti e le modifiche che vengono apportati al progetto che derivano dall'incertezza degli obiettivi causano un aumento della complessità. È importante notare che l'effetto sul progetto di molti cambiamenti è maggiore della somma degli effetti di ciascun cambiamento individuale.

La conclusione dell'autore è che la complessità di progetto sia caratterizzata da due dimensioni, ciascuna con due sottodimensioni:

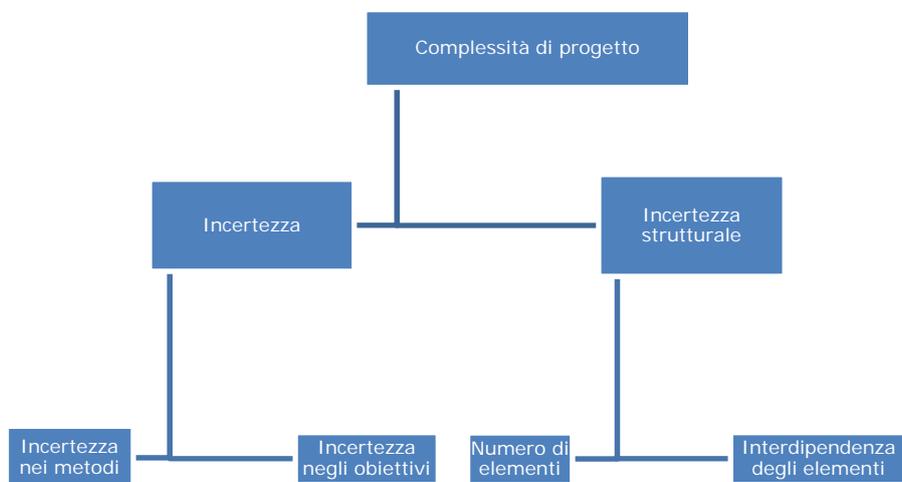


Fig.8.1.1 Elementi della complessità di progetto [116]

Viene sottolineato infine che la complessità strutturale dei progetti sta aumentando a causa del maggior numero di funzioni, della riduzione nella dimensione fisica, della maggiore inter-

connettività del prodotto e per la riduzione dei tempi di svolgimento del progetto e il sempre maggiore utilizzo dei metodi di ingegneria concorrente.

Altro lavoro significativo riguardante il legame tra complessità e innovazione che conferma l'importanza della valutazione della complessità durante la progettazione di prodotto è quello più recente di **Schuh** [120]. L'autore sostiene che la complessità porta all'aumento esponenziale dei costi di ricerca e sviluppo in quanto in genere le nuove soluzioni comportano sistemi di complessità crescente caratterizzate da interdipendenze tra singoli moduli e componenti. La ormai dilagante personalizzazione del prodotto al cliente comporta una sempre maggiore complessità interna del ciclo di vita del prodotto quindi l'autore individua nella *Release Engineering* uno strumento per ridurre la complessità di un prodotto industriale. Questo strumento software di supporto alla progettazione utilizza un principio basilare di sviluppo del software procedendo ad un suo continuo aggiornamento in tempo reale in base alle mutate esigenze e alle necessarie modifiche, e nel caso di sviluppo di prodotto, consente di bilanciare le esigenze contrastanti della cattura di nicchie di mercato con l'aumento di complessità del prodotto stesso. In particolare nel settore automotive l'utilizzo della Release Engineering consente di ridurre il numero dei cambiamenti a produzione iniziata, normalmente superiori al 50% del totale dei cambiamenti richiesti.

8.1.2 La teoria del Design Assiomatico e i diversi tipi di complessità

Uno dei punti di riferimento in letteratura relativamente alla progettazione di prodotto e in particolare alla complessità con particolare riferimento a tale fase è la *Teoria del Design Assiomatico* del Prof. Suh.

Il progetto può esser definito come il supporto informativo del prodotto che tramite i parametri di progetto (Design Parameters) ne definisce specifiche e caratteristiche al fine di soddisfare i requisiti funzionali (Functional Requirements) che vengono definiti a partire dai bisogni del cliente.

La sequenza che caratterizza lo sviluppo di un progetto è pertanto:



Nel 2005 viene pubblicato da *N.P.Suh* l'articolo "Complexity in Engineering" [121] basato sulla teoria del design assiomatico esposta dallo stesso autore nella monografia "Complexity: Theory and applications" [122] e da un'ulteriore significativa pubblicazione al proposito [123]. Finalità del lavoro è sottolineare come nell'ingegneria l'obiettivo debba essere ridurre la complessità del sistema attraverso l'uso di un approccio progettuale razionale, basato sui principi fondamentali per aumentare la affidabilità, ridurre il costo dello sviluppo e delle operazioni ed esaltare la prestazione.

Il lavoro di Suh trae origine dalla teoria della progettazione assiomatica sviluppata dallo stesso autore pubblicata nel 1990 [124], che verrà ripresa anche da Guenov [125] e si riferisce al progetto sia di prodotto che di sistema manifatturiero, attribuendo alla complessità il significato di misura dell'incertezza nell'ottenere i requisiti funzionali FR all'interno del range di progetto definito a partire dai parametri di progetto DP.

La *complessità funzionale* così definita può derivare da una progettazione scarsa o da un'insufficiente comprensione del sistema.

E' possibile individuare due modalità secondo le quali definire la complessità:

- Complessità all'interno di un dominio *fisico*
- Complessità all'interno di un dominio *funzionale*.

Se l'approccio fisico porta a considerare la complessità come qualcosa di relativo al numero di parti di cui è composto un prodotto/sistema e alla loro interazione, l'approccio funzionale tratta la complessità valutando le prestazioni del prodotto/sistema cioè "ciò che vogliamo ottenere" in "ciò che è ottenibile", a partire dai DP che definiscono un range di design all'interno del quale dovrebbero cadere i valori dei FR del prodotto.

Nella progettazione occorre soddisfare gli FRs all'interno di range specifici di progetto, ma la reale prestazione del sistema può condurre ad un range del sistema che non coincide perfettamente con quello di progetto, quindi i FRs non vengono più soddisfatti. Quando gli FRs non possono essere soddisfatti il compito appare complesso. Pertanto la complessità è definita come una misura della incertezza nel raggiungere i FRs.

Rifacendosi alla teoria del design assiomatico vengono introdotti alcuni concetti: la tolleranza per un sistema accoppiato è espressa da:

$$\Delta DP_i = \frac{\Delta FR_i}{A_{ii}}$$

dove la matrice di design A_{ii} è una matrice diagonale quindi il vettore sarà nel caso di 3 parametri per un sistema accoppiato.

Le connessioni tra FRs e DP possono essere rappresentate attraverso questa matrice dove lo 0 corrisponde a non connessione e valori diversi crescenti ad una connessione via via più forte. Meno la matrice è popolata, cioè più 0 ci sono, meno sono i gradi di interazione tra gli FRs.

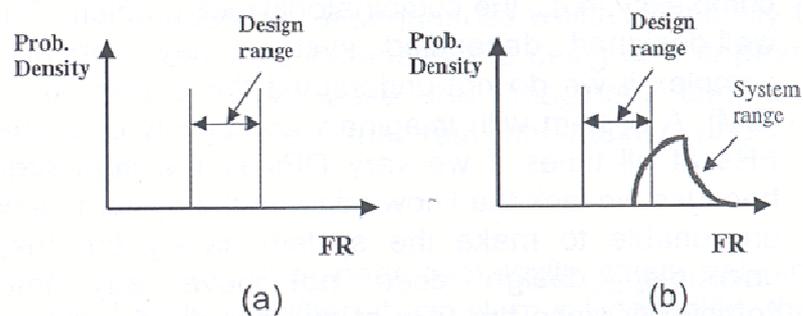


Fig.8.1.2. Necessità di soddisfare gli FRs all'interno dei design range [120]

(a) The design range of FR vs probability density; (b) The system range of the system does not fully lie inside the design range. The complexity of (a) is zero and the complexity of (b) is finite.

Quando esistono molti FRs che un sistema deve soddisfare contemporaneamente, la complessità del sistema è determinata dal fatto che i DP scelti per soddisfare gli FRs colleghino tra loro gli FRs stessi. Il sistema è meno complesso quando ogni FR può essere soddisfatto senza influenzare gli altri FR cioè variando il suo DP corrispondente, senza influire sugli altri requisiti, in questo caso il sistema si definisce *uncoupled*.

In questo caso si ha una matrice diagonale ed è facile fare ricadere il range di sistema dentro il range di progetto.

La complessità invece aumenta per un sistema *decoupled* per il quale si ha una matrice triangolare:

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A11 & 0 & 0 \\ A21 & A22 & 0 \\ A31 & A32 & A33 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix}$$

cioè i DP hanno delle tolleranze che rendono gli FRs non completamente indipendenti come nel primo modello ma neanche strettamente legati. Cioè in questo caso solo una determinata sequenza di DP può soddisfare gli FR.

Infine il progetto è definito *coupled* quando la variazione di un DP causa il cambiamento di un FR e di conseguenza anche di tutti gli altri, cioè gli FR sono strettamente connessi tra loro. Il sistema coupled ha in genere una complessità maggiore dei sistemi uncoupled e decoupled. Un sistema è per forza coupled quando il numero degli FR è maggiore del numero dei DP.

$$\begin{Bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 \\ A21 & A22 & A23 \\ A31 & A32 & A33 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{Bmatrix}$$

Viene definita una complessità relativa al prodotto ed alla sua progettazione come misura della *incertezza* nel raggiungere gli FR all'interno del range di progetto definito. Quindi la complessità viene determinata dalla relazione tra il range in cui cadono gli FRs della progettazione e il range in cui cadono gli FR del sistema.

La complessità può essere una funzione del tempo o può essere completamente indipendente dal tempo, a seconda se il range di sistema cambia o no in funzione del tempo.

In base alla teoria della complessità basata sul design assiomatico è possibile definire quattro tipi di complessità come mostrato in figura 8.1.3.

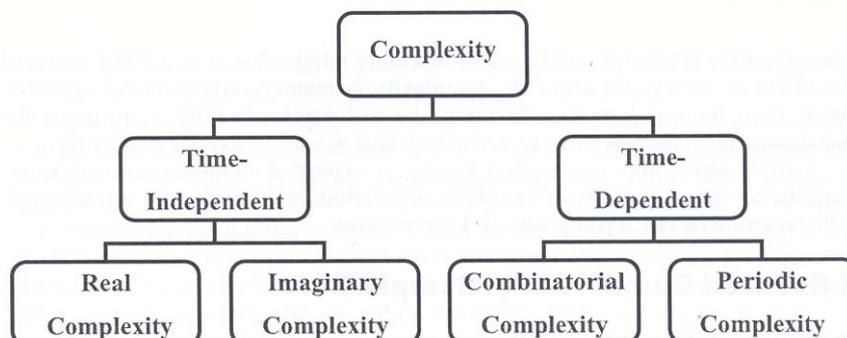


Fig.8.1.3 I diversi tipi di complessità [121]

Complessità reale indipendente dal tempo:

Misura della incertezza quando la probabilità di raggiungere gli FR è meno di 1.0 perché il range del sistema non cade dentro quello di progetto. Cioè gli FR non vengono mai soddisfatti.

Ex. il taglio preciso di una barra metallica con una sega

Motivi per cui insorge questa complessità:

- accoppiamento degli FR (coupled design)
- decremento nella tolleranza ammissibile dovuta alla presenza di termini accoppiati
- mancanza di robustezza del progetto (troppa rigidità)
- scelta sbagliata dei parametri di progetto DP
- scomposizione sbagliata degli FR e parametri di progetto

Come eliminare la complessità reale:

- progettare in modo tale che i FR siano indipendenti e rendere il progetto robusto al fine che il range del sistema stia sempre nel range del progetto

Suh confuta la comune teoria che un sistema con un elevato numero di componenti sia più complicato di un sistema con un numero più ridotto di componenti. Sostiene infatti che questa affermazione è vera solo se l'interfaccia tra le parti interconnesse aggiunge ulteriore incertezza nel soddisfare gli FR. Ma se ciò non succede la semplice presenza di parti interconnesse non implica necessariamente che il sistema sia più complesso.

Complessità immaginaria indipendente dal tempo:

Incertezza che non è reale incertezza perché deriva dalla mancanza di conoscenza del progettista o dell'utilizzatore e dalla comprensione dello specifico progetto e utilizzo del prodotto.

Ex. la mancanza di conoscenza della combinazione di una cassaforte che ne impedisce la apertura.

Questa complessità esiste solo nei sistemi *decoupled*, cioè dove gli FR non sono né completamente indipendenti né completamente correlati.

Come eliminare la complessità immaginaria:

- Scrivere le equazioni di progetto che mettono in relazione i FR con i DP e seguire la sequenza di cambio dei DP come fornita dalla matrice di design. Comprendere cioè il funzionamento del prodotto.

Consigli per il progettista:

- Il progettista deve costruire un progetto robusto (FR indipendenti) e definire bene il funzionamento del prodotto (relazioni tra FR e DP) anche attraverso un chiaro manuale di istruzioni.

Consideriamo un progetto disaccoppiato con FR e DP legati dalla seguente relazione:

$$\begin{pmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \\ \dots \\ FRm \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & \dots & 0 \\ X & X & 0 & \dots & 0 \\ X & X & X & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ X & X & X & \dots & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP1 \\ DP2 \\ \dots \\ DPm \end{pmatrix}$$

se la matrice è rispettata avremo complessità reale pari a 0, ma il progettista difficilmente riesce a realizzare la matrice in modo tale da rendere 0 la complessità reale. La complessità che ne deriva non è pertanto propria del sistema, bensì del progetto, e dipende essenzialmente dal fatto che difficilmente il progettista possiede tutti i dati necessari per minimizzare la complessità.

La complessità immaginaria non dipendente dal tempo esiste solo nei sistemi decoupled. Quando il sistema è uncoupled non c'è complessità immaginaria perché i FRs possono essere soddisfatti in qualsiasi ordine.

La complessità dipendente dal tempo è dovuta a eventi futuri che influenzano il sistema in modi imprevedibili, la figura si riferisce alla variabilità degli FR nel tempo al di fuori del range di progettazione (design).

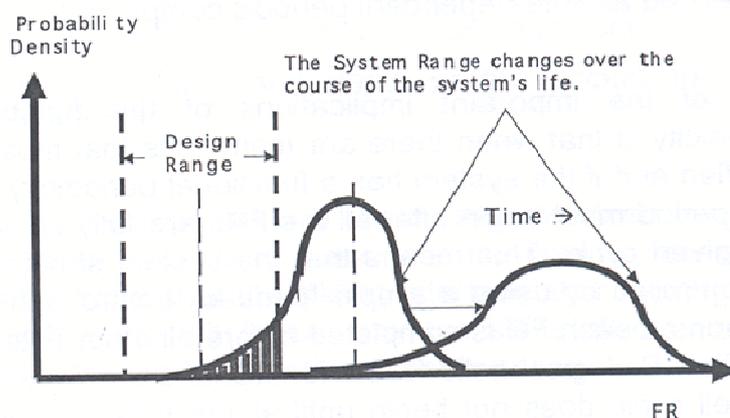


Fig. 8.1.4 spostamento range di progetto nel tempo [121]

Si possono definire due tipi di complessità dipendente dal tempo:

Complessità combinatoria dipendente dal tempo:

Aumenta in funzione del tempo a causa della continua espansione nel numero di possibili combinazioni che potrebbero eventualmente portare ad uno stato di caos, guasto o anche

distruzione totale del sistema. Questa complessità è dovuta alla imprevedibilità degli eventi futuri ed è influenzata dalle decisioni prese in precedenza.

Come eliminare la complessità combinatoria:

- Inventare dei mezzi per impedire al range di sistema di spostarsi dal range di design. Per ex. dispositivi di sicurezza che controllino eventuali eventi imprevisti e ne limitino le conseguenze. Piani di manutenzione programmata per prevenire i guasti e le rotture.

Complessità periodica dipendente dal tempo:

Esiste in un dato periodo di tempo, nell'ambito del quale ci sono delle incertezze che vengono però annullate al termine del periodo. E' dovuta a evoluzioni imprevedibili del sistema. Il range di sistema si allontana ciclicamente dal range di progetto.

La complessità periodica implica che il nuovo periodo debba cominciare dopo che gli FRs sono tutti soddisfatti al termine del ciclo precedente.

La complessità periodica è preferibile a quella combinatoria in quanto viene annullata periodicamente e quindi si controlla meglio evitando che il sistema arrivi a rottura inaspettatamente.

Per ridurre queste due complessità si deve cercare di prevedere ed evitare che il range di sistema esca fuori dal range di design. Nel primo caso si tratta per lo più di problemi combinatori che evolvendosi nel tempo tendono ad espandersi su più parti del sistema diventando molto complessi e dovuti tal volta alla violazione dell'assioma di indipendenza.

Esempio: il caso di un aeroporto inagibile a causa di una tempesta crea la necessità di utilizzo di altre piste per l'atterraggio in zone limitrofe, causando ritardi e cancellazioni anche sui voli in partenza da altri aeroporti. Per far fronte a queste eventualità il sistema di traffico aereo è dotato di una certa flessibilità, ma soprattutto la programmazione dei voli viene aggiornata ogni 24 ore, in tal modo la complessità combinatoria derivante da un ritardo viene annullata allo scadere del periodo di riprogrammazione. Molti sistemi hanno una propria periodicità funzionale, rinnovando periodicamente i FR una volta che i precedenti sono stati soddisfatti. In questo caso, come detto, la complessità dipendente dal tempo ha durata limitata all'interno del periodo, si parla pertanto di complessità periodica del sistema. Un metodo per arginare la complessità combinatoria è appunto dotare il sistema di una certa periodicità nel tempo in modo da trasformare una potenzialmente catastrofica complessità combinatoria in una limitata e gestibile complessità periodica. Si noti che

in questo caso il tempo non viene considerato come un obiettivo susseguirsi di istanti ma come un soggetto susseguirsi di eventi relativi al sistema.

Consigli per il progettista:

- In presenza di eventi inevitabili e imprevedibili, il progettista deve cercare di progettare il sistema con complessità periodica.

L'obiettivo che ci si pone è di ridurre la complessità del sistema, così da rendere il progetto robusto, garantire la sua stabilità a lungo termine, renderlo affidabile, migliorare la produttività e minimizzare i costi.

A tal fine possono quindi essere condotte quattro azioni in base alle considerazioni sopra esposte:

1. minimizzare il numero di requisiti funzionali del prodotto e la loro interdipendenza attraverso progetti modulari e disaccoppiati per ridurre la complessità reale
2. eliminare la complessità reale indipendente dal tempo, cioè garantire che il prodotto soddisfi gli FRs.
3. eliminare la complessità immaginaria indipendente dal tempo comprendendo la relazione tra i requisiti funzionali ed i parametri di progetto
4. trasformare il sistema con complessità combinatoria dipendente dal tempo in un sistema con complessità periodica dipendente dal tempo, introducendo una periodicità funzionale e re-inizializzando il sistema all'inizio di ogni periodo.

Per rendere possibile la trasformazione del punto 4 e introdurre una periodicità funzionale nel sistema è necessario disaccoppiare un sistema accoppiato ed essere sicuri che gli FR possano essere soddisfatti indipendentemente dal fatto che l'assioma di indipendenza sia rispettato o meno. Devono essere pertanto soddisfatti due requisiti. Deve esistere una serie di funzioni ripetitive e bisogna identificare la o le funzioni che vogliamo impedire che evolvano in uno stato casuale e caotico.

Si può pertanto trasformare il sistema da *coupled* a *decoupled* e occorre individuare la funzione che si vuole evitare che diventi casuale e finisca in uno stato di caos. La funzionalità periodica può essere ottenuta con diversi mezzi: temporale, geometrico, biologico, chimico, termico e elettrico e può essere controllata tramite processi manifatturieri, processi di informazione o cicli circadiani.

Esempio: superfici a contatto senza lubrificante, l'attrito genera particelle che causano l'usura delle superfici, tali particelle aumentano nel tempo causando usura sempre maggiore. Per interrompere questo processo combinatorio vengono create superfici ondulate nelle cui pieghe si

raccogliono le particelle evitando l'attrito sulle superfici e la generazione di nuove particelle. In questo caso si trasforma la complessità in periodica grazie a una funzionalità geometrica, quindi la re-inizializzazione avviene intrinsecamente nell'ambito del progetto del sistema.

Risulta pertanto chiaro che un sistema stabile e affidabile deve essere periodico e che il concetto della **periodicità funzionale è importante per la riduzione della complessità**.

La teoria del design assiomatico include diversi teoremi relativi alla complessità che possono essere utili per trattare e ridurre l'incertezza dei sistemi:

Complessità di un sistema disaccoppiato con un elevato numero di parti interconnesse:

La complessità di un sistema staccato con un elevato numero di parti interconnesse non è necessariamente maggiore di quella di un sistema con un numero minore di parti se le interfacce fra le parti del sistema staccato non aumentano l'incertezza riducendo la differenza fra range di design o di sistema.

Complessità di un sistema non accoppiato con parecchie parti connesse:

La complessità di un sistema non accoppiato con un elevato numero di parti connesse non è necessariamente maggiore di quella di un sistema con un numero minore di parti se le interfacce fra le parti del sistema non accoppiato non aumentano l'incertezza riducendo la differenza fra range di design o di sistema.

Complessità di un sistema accoppiato con parecchie parti connesse:

La complessità di un sistema accoppiato con un elevato numero di parti connesse è sempre maggiore di quella di un sistema con un numero minore di parti fino a quando una o più variazioni delle interfacce fra le parti del sistema accoppiato non aumentano l'incertezza riducendo la differenza fra range di design o di sistema.

Complessità di un sistema non accoppiato con una disposizione di parti interconnesse complicata:

La complessità di un sistema staccato con una disposizione di parti interconnesse complicata non è necessariamente maggiore di quella di un sistema con disposizione delle parti più semplice se le interfacce fra le parti del sistema non accoppiato non aumentano l'incertezza riducendo la differenza fra range di design o di sistema.

Complessità di un sistema accoppiato con una disposizione di parti interconnesse complicata:

La complessità di un sistema staccato con una disposizione di parti interconnesse complicata non è necessariamente maggiore di quella di un sistema con disposizione delle parti più semplice

finché qualche variazione alle interfacce fra le parti del sistema accoppiato non aumenta l'incertezza riducendo la differenza fra range di design o di sistema.

Complessità immaginaria di un sistema non accoppiato con disposizione complicata delle parti:

La complessità immaginaria non dipendente dal tempo di un sistema non accoppiato con disposizione complicata delle parti può essere alta se i DP non sono cambiati nella sequenza data dalla matrice di design.

Complessità di un sistema che incrocia scale diverse di tempo:

Quando un sistema deve essere integrato attraverso diverse scale di tempo, deve essere diviso in sub-unità minori che saranno quindi integrate, per minimizzare il contenuto delle informazioni e ridurre la complessità reale.

In conclusione esistono due tipi di complessità: quella dipendente dal tempo, combinatoria e periodica e la complessità indipendente dal tempo, suddivisa in complessità reale e immaginaria, tra loro completamente ortogonali e che formano una somma vettoriale di complessità assoluta.

Considerazioni sulla complessità basata sulla teoria del design assiomatico:

Lo studio di Suh costituisce uno dei principali approcci scientifici sulla complessità tecnologica risulta molto interessante in un'ottica di Concurrent Engineering e Design for Manufacturing in cui la progettazione viene eseguita in modo integrato alla produzione. Il problema fondamentale è riuscire già nella fase di progetto ad individuare i requisiti funzionali del prodotto, a definire la matrice di design e ad impostare un cosiddetto progetto robusto che consenta il giusto grado di correlazione tra i parametri di progetto e gli stessi requisiti funzionali.

Nel **2002 M.D. Guenov** [125] usa i principi della progettazione strutturale enunciati da Suh nel 1990 e applica il *modello entropico* per misurare la *complessità e correlarla a fattori economici*. L'autore si rifà alla teoria della progettazione assiomatica sviluppata da Suh dove venivano definiti i quattro domini in cui si svolge la progettazione: di cliente, funzionale, fisico e di processo. Attraverso una serie di iterazioni il processo di progettazione converte i bisogni del cliente in requisiti funzionali (Functional Requirements: FRs) e vincoli (Cs: Constraints), che vengono incorporati in parametri di progetto (Design Parameters: DPs). Questi ultimi possono influenzare ed essere influenzati dalla produzione cioè dalle variabili di processo.

Sistema uncoupled

	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
FR1	X				
FR2		X			
FR3			X		
FR4				X	
FR5					X

	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
FR1	X	X	X	X	X
FR2					
FR3					
FR4					
FR5					

	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
FR1	X		X		
FR2					
FR3					
FR4		X		X	
FR5					X

	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
FR1	X				
FR2	X				
FR3	X				
FR4	X				
FR5	X				

Sistema decoupled

	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
FR1	X				
FR2		X			
FR3		X	X		
FR4		X		X	
FR5		X			X

	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
FR1	X				X
FR2		X			
FR3			X		
FR4		X		X	
FR5				X	X

Sistema coupled

	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
FR1	X			X	X
FR2		X			
FR3			X		
FR4				X	
FR5		X	X		X

	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5
FR1	X	X	X	X	X
FR2	X	X	X	X	X
FR3	X	X	X	X	X
FR4	X	X	X	X	X
FR5	X	X	X	X	X

Fig.8.1.5 Matrici di progettazione e distribuzione delle connessioni, il simbolo X corrisponde a una connessione [125].

Le connessioni tra FRs e DP possono essere rappresentate attraverso una matrice dove lo 0 corrisponde a non connessione e valori diversi crescenti ad una connessione sempre più forte. Meno la matrice è popolata, cioè più 0 ci sono, meno sono i gradi di interazione tra gli FRs. Il simbolo X indica una connessione (coupling).

Si distinguono tre sistemi:

- Sistema *uncoupled*: matrice diagonale (popolata solo sulla diagonale)
- Sistema *decoupled*: matrice triangolare bassa (popolata solo nella parte sotto la diagonale)
- Sistema *coupled*: matrice molto popolata in tutte le sua parti con pochi valori pari a zero

Confrontando le matrici sopra riportate corrispondenti a diversi progetti, si dimostra che il sistema più complesso, rappresentato dalla matrice h popolata in tutti gli elementi, viene efficacemente stimato attraverso la misura di una complessità tramite il metodo entropico:

$$S = \sum N_i \ln N_i$$

rispetto alla semplice misura di N o ad altri parametri e calcoli che possono venire effettuati.

Viene inoltre correlato il grado di accoppiamento tra i requisiti funzionali e quindi di complessità del sistema con criteri di tipo economico definendo un indice di efficacia di valore e costo:

$$I_v = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k f_{ij} c_{ij}$$

dove

i = [1, ..., n] numero di FRs

j = [1, ..., K] numero di DP

f_{ij} è il grado in cui un accoppiamento con un parametro DP_j soddisfa il requisito funzionale FR_i

c_{ij} è il costo-beneficio del rapporto di accoppiamento tra il requisito funzionale i e il parametro di progettazione j

$$c_{ij} = \sum_{l=1}^W s_{ij}^l \frac{S_{ij}^l}{g_{ij}^l}$$

in cui

S_{ij}^l sono i benefici stimati dovuti all'accoppiamento degli FRi con i DPi

g_{ij}^1 sono i costi stimati dovuti all'accoppiamento degli FRi con i DPj

I valori di s_{ij}^1 e g_{ij}^1 possono essere assegnati sulla base di dati reperibili in letteratura o di interviste ai responsabili aziendali.

Complessità e indice di efficacia di valore e di costo sono pertanto parametri che possono supportare i progettisti e i manager di produzione durante le fasi iniziali di progettazione e programmazione di un sistema complesso, quindi strumenti utili per la presa di decisioni.

Nel 2005 *KH.Ko, C.Yu, K. Pochiraju e S.Manoochehri* [126] in un interessante lavoro propongono una misura entropica della complessità basata su indicatori dei differenti parametri di progetto e relativi legami che vengono rilevati durante la progettazione e sviluppo del prodotto in un ambito di *Knowledge-Based Engineering*. Il metodo pertanto consente di valutare e scegliere il processo di progetto del prodotto migliore utilizzando la *complessità, misurata attraverso una metodologia ibrida*.

Il processo di sviluppo del prodotto è costituito in una serie di passi di un processo asincrono in cui la geometria, i materiali, e i processi di fabbricazione sono definiti per soddisfare la prestazione e i requisiti di costo. E' noto che alla fase iniziale del progetto, le modifiche progettuali sono economiche e facili da implementare ma quando la progettazione progredisce cambiamenti di materiale, macchinari di processo, e geometria sono più costosi e richiedono un maggiore tempo di implementazione. Al fine di analizzare e capire come si evolve il progetto nel tempo è utile disporre di una metodologia che tracci l'evoluzione delle informazioni e dipendenze di progetto basata sulla teoria della complessità. Infatti attraverso l'evoluzione della complessità si può individuare un modello specifico per un certo processo di progettazione che fornisce suggerimenti nella selezione di un particolare progetto rispetto ad altre alternative.

Gli autori considerano che un sistema è una raccolta di più elementi in comunicazione tra loro, descritta nell'ambito di un data-base per la gestione della conoscenza (Knowledge-Base). Definiscono pertanto diversi tipi di complessità che verranno riuniti e interpretati attraverso il data-base.

- *Complessità dimensionale:*

La teoria dell'informazione sostiene che l'informazione può essere ottenuta dalla distinzione tra lo stato in cui un sistema si trova e gli altri stati che il sistema può avere, pertanto se indichiamo con Ω il numero di stati possibili per un sistema, supponendo che il sistema si trovi in ciascuno stato con la stessa probabilità la complessità del sistema coincide con la sua entropia:

$$I = \log_2(\Omega)$$

- *Complessità di legame:*

La complessità di un sistema è caratterizzata non solo dall'aspetto dimensionale ma anche da come gli elementi del sistema interagiscono tra loro. Si considera la densità di interazione come misura per determinare la complessità di interazione o legame siccome mostra le interazioni che in media ciascun elemento ha con gli altri.

$$C_L = \frac{L}{E}$$

in cui

L è il numero di legami semplici

E è il numero di elementi del sistema.

- *Complessità computazionale:*

Questa complessità si riferisce alla difficoltà di calcolo attraverso algoritmi efficienti e risorse adeguate (memorie RAM, Hard Disk, tempo di esecuzione del processore ecc.).

Si riferisce a due livelli di scala: livello elemento, che considera solamente complessità di dimensione e legame dell'elemento individuale mentre il livello sistema include gli effetti di non solo i dettagli di ciascun elemento ma di tutti.

Nell'ambito della complessità computazionale viene definito come calcolare le complessità di dimensione e di legame di un elemento e di come le complessità degli elementi sono combinate per rappresentare le complessità di dimensione e link di un sistema.

- *Complessità di elemento*

E' misurata basandosi su 4 parametri: numero di variabili (statiche) indipendenti V_I , numero di variabili dinamiche dipendenti V_D , numero di operazioni funzionali V_F , e numero di referenze esterne V_E . Le variabili indipendenti V_I che contengono valori costanti forniti dall'utilizzatore costituiscono l'input dell'elemento.

La complessità dimensionale dell'i-esimo elemento può essere calcolata come:

$$C_S^i = \log_2(nV_I + nV_D + 1)$$

e quella di legame come:

$$C_L^i = \frac{nV_F}{(nV_I + nV_D)}$$

- *Complessità di sistema*

La *complessità dimensionale di sistema* viene calcolata sommando le complessità dimensionali in termini di entropia dei singoli elementi:

$$C_S = \sum_{i=1}^E \log_2(V_i + 1)$$

in cui

$V_i = nV_I^i + nV_D^i$ per l'i-esimo elemento

E totale del numero di elementi del sistema

Se la complessità dimensionale è determinata dalla aggregazione delle complessità dimensionali degli elementi individuali, la complessità di legame di un sistema invece non è additiva ma moltiplicativa.

Le interazioni all'interno di un elemento sono caratterizzate dal numero di operazioni, cioè dalle rappresentazioni funzionali delle variabili dipendenti intese come operazioni di semplice matematica o più complicate logiche di programma. Le interazioni tra elementi sono invece rappresentate dalle referenze esterne degli elementi che mostrano come gli elementi interagiscono tra di loro. Di seguito si riportano le due forme che la *complessità di legame di sistema* assume a seconda che il numero di elementi sia 1 oppure maggiore uguale a 2.

$$C_L = \sum_{i=1}^E \left(\left(\frac{nV_F^i}{V_i} + 1 \right) \times \frac{nV_E^i}{E} \right), E > 1$$

$$\frac{nV_F^i}{V_i}, E = 1, i = 1$$

in cui nV_E^i è il numero di V_E nell'i-esimo elemento.

Per quanto riguarda la struttura Knowledge-Base vengono inoltre distinte due complessità:

- *Complessità statica:*

nel caso di un processo di progettazione prodotto è definita come la complessità determinata dalla struttura di un dato Knowledge-Base, calcolata sulla base del numero di parametri di progetto e delle loro interazioni tramite le formule sopra riportate

- *Complessità dinamica:*

si riferisce ad un sistema in evoluzione calcolando la complessità a partire del valore dei parametri variabile nel tempo e quindi definito istante dopo istante.

Viene di seguito riportato un esempio illustrativo relativo alla copertura in plastica di un cellulare, fabbricata con un processo di presso-fusione in cui viene calcolata la complessità statica. A tale scopo il processo di progettazione viene diviso in cinque fasi principali in cui rispettivamente la geometria, i materiali, le macchine, i processi e i costi economici del progetto vengono completamente definiti. Tali elementi interagiscono tra loro nell'ambito di una specifica struttura Knowledge-Base. In tab.8.1.1 vengono riassunte le dipendenze parametriche tra i diversi elementi di progetto.

	<i>Geometria</i>	<i>Processo</i>	<i>Macchina</i>	<i>Materiale</i>	<i>Economia</i>
<i>Geometria</i>	X	0	0	1	0
<i>Processo</i>	8	X	7	22	0
<i>Macchina</i>	0	0	X	0	0
<i>Materiale</i>	0	0	0	X	0
<i>Economia</i>	13	8	4	2	X

Tab. 8.1.1 Dipendenze esterne tra vari elementi di progetto [126]

Gli elementi di geometria descrivono i parametri geometrici che vengono utilizzati per determinare l'area della superficie e i calcoli di volume richiesti per il processo e le stime di costo. Gli elementi di processo reperiscono i parametri necessari da altri elementi e calcolano le relative informazioni di fabbricazione così come il tempo di ciclo di produzione Macchina si riferisce ai parametri tecnologici del macchinario di produzione così come la capacità macchina richiesta, materiale ai diversi materiali utilizzati per la fabbricazione del prodotto e gli elementi dell'economia stimano il costo di progetto dello stampo, il costo totale di produzione, il costo totale per unità ecc.

Nella tabella 8.1.1 ad esempio il processo di presso-fusione si riferisce a 8 valori per gli elementi di geometria, 7 valori per i parametri macchina e 22 valori dai dati del materiale. La

somma di ogni riga corrisponde al numero totale di link esterni che un elemento ha, che dovrebbe essere equivalente a V_E^l . La somma di ogni colonna corrisponde invece a quante volte l'elemento in colonna è referenziato esternamente. Applicando le formule sopra riportate si ottengono i valori riportati in tab. 8.1.2 che consentono di calcolare la complessità statica del sistema constatando che mentre la complessità dimensionale è l'aggregato della complessità dimensionale degli elementi individuali, la complessità di legame del sistema è approssimativamente 20 volte quella dell'elemento con la massima complessità di legame.

	V_I^i	V_D^i	V_F^i	V_E^i	C_S^i	C_L^i
<i>Geometria</i>	11	13	9	1	4,64	0,36
<i>Processo</i>	21	71	137	37	6,54	1,49
<i>Macchina</i>	18	0	0	0	4,25	0
<i>Materiale</i>	51	0	0	0	5,70	0
<i>Economia</i>	71	157	225	27	7,84	0,97
	Static Complexity of the KB				28,97	29,42

Tab. 8.1.2 Parametri determinanti complessità dimensionale e di legame per la design knowledge-base esaminata [126]

Al fine di utilizzare i valori della complessità statica per la scelta del migliore processo di progettazione del prodotto occorre calcolare la sua evoluzione per successivi stati del progetto e definizione dei relativi parametri e in corrispondenza delle tre diverse possibili sequenze delle tre fasi di definizione del progetto: scelta geometria, materiale, processo:

- primo approccio-geometrico in cui la geometria è definita prima di materiale e processo
- primo approccio-materiale in cui il materiale e processo sono definiti prima della geometria
- primo approccio-processo in cui il processo è definito per primo, seguito dal materiale e dalla geometria.

I risultati che si ottengono vengono rappresentati graficamente in figura 8.1.5 e 8.1.6 consentendo al progettista di scegliere la migliore soluzione.

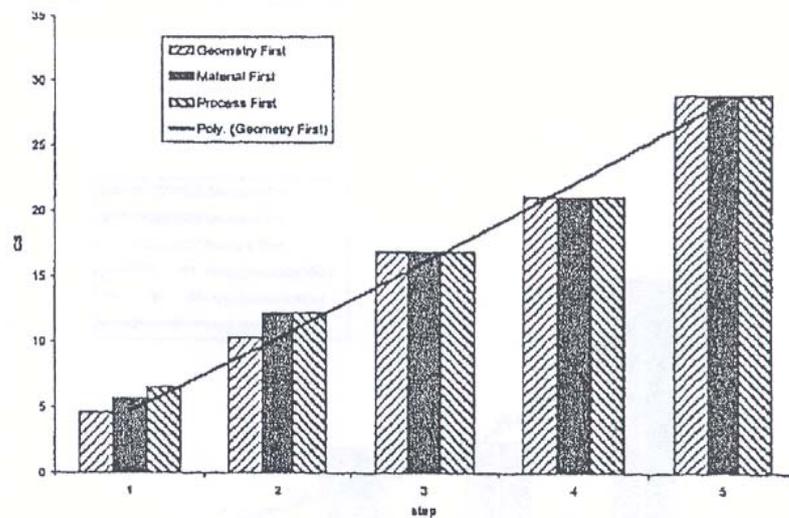


Fig.8.1.6 Complessità dimensionale statica (C_s) del knowledge-base per le tre sequenze di processo di progettazione [126]

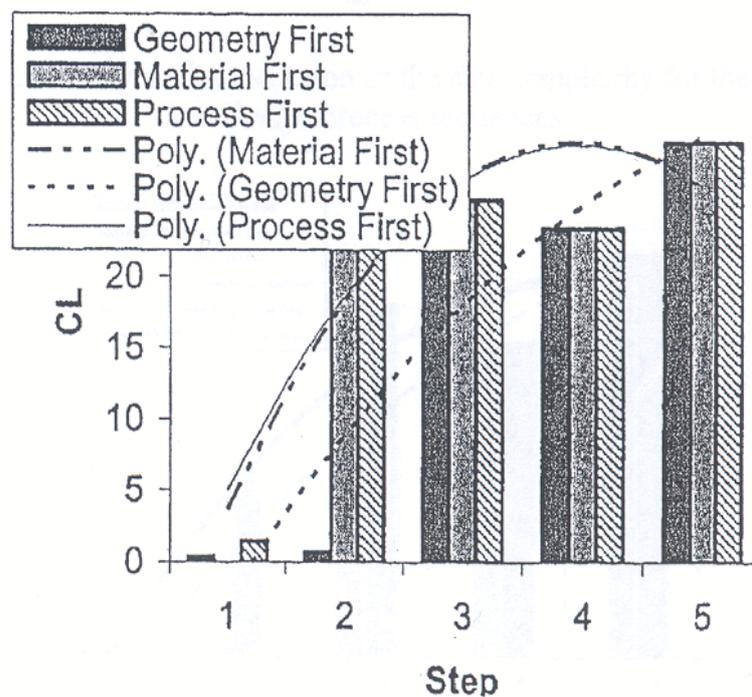


Fig. 8.1.7 Complessità di legame statica (C_L) del Knowledge-Base per le tre sequenze di processo di progettazione [126]

8.1.3 La complessità nel design vista dal Prof. W.H. ElMaraghy & c.

In un recente articolo del 2007 *T.Tomiyama, V.D'Amelio, J.Urbancic e W.H.ElMaraghy* [127] approfondiscono il tema della complessità della progettazione a partire dalla teoria della

Progettazione Assiomatica di Suh e in particolare considerando le caratteristiche multidisciplinari che ormai caratterizzano la maggior parte dei prodotti, basti pensare alle macchine e attrezzature meccatroniche. La multidisciplinarietà infatti da sola è utile per raggiungere funzionalità superiori.

Innanzitutto definiscono una struttura della conoscenza rappresentata da teorie, assiomi e dalle relazioni tra questi. Sono proprio queste interazioni a generare la complessità dei problemi multidisciplinari.

Vengono introdotti due diversi tipi di complessità:

- (i) complessità da progettazione
- (ii) complessità intrinseca della multidisciplinarietà.

Questi due tipi di complessità non solo rendono i processi di sviluppo del prodotto difficili, ma causano veri e propri insuccessi del progetto attraverso indesiderati e imprevedibili accoppiamenti dei parametri di progettazione e a causa dell'interazione con fenomeni fisici.

In particolare la *complessità da progettazione* si riferisce alla scelta del progettista di ricorrere ad una teoria piuttosto che ad un'altra per progettare il prodotto, per esempio dovendo trasmettere energia si può scegliere tra una trasmissione meccanica basata sulla teoria degli elementi di macchine oppure una trasmissione idraulica basata sulla teoria della dinamica. Il principio alla base della complessità da progettazione è rappresentato in fig. 8.1.8.

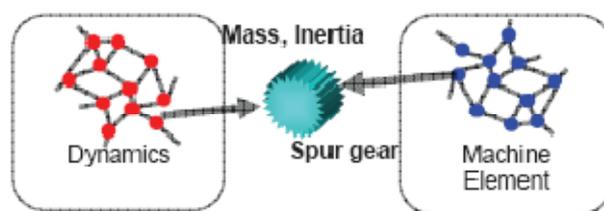


Fig. 8.1.8 Due teorie sono indipendenti, ma condividono un oggetto fisico attraverso la designazione dell'oggetto in diversi contesti [127]

La *complessità intrinseca della multidisciplinarietà* è causata invece dalle interazioni imprevedibili tra i parametri di progetto. In questo caso il progettista non sceglie una teoria piuttosto che un'altra ma è la fisica che causa il legame tra le due teorie. Per esempio è il caso del progetto di un dispositivo basato su principi della dinamica in cui insorgono fenomeni di elettromagnetismo. La rappresentazione della complessità intrinseca della multidisciplinarietà è riportata in fig.8.18.

Questi due tipi di complessità insorgono durante la progettazione: l'indipendenza dei requisiti funzionali FR (Functional Requirements) può infatti essere violata da interazioni sconosciute e nascoste tra i parametri di progetto (Design Parameters).

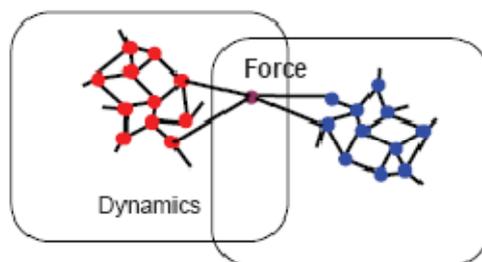


Fig. 8.1.9 Due teorie sono indipendenti, ma condividono uno stesso concetto fisico [127]

Quando si progetta un sistema complesso, l'approccio tradizionale è di tipo riduzionista, cioè il problema complessivo viene suddiviso in una serie di elementi più semplici. Questa metodologia è in genere efficace, però occorre considerare che soluzioni ottimali per un campo di progettazione possono essere sub-ottimali quando si considera l'insieme complesso o possono insorgere dei problemi dovuti alla mancanza di comprensione delle implicazioni di certe decisioni di progetto in altri campi della progettazione. Inoltre l'insieme complesso può mostrare proprietà che non sono prontamente spiegabili attraverso la comprensione dei singoli elementi, per esempio inaspettate proprietà collettive emergenti durante l'uso del sistema. Alcuni di questi comportamenti indesiderati del sistema sono dovuti ad accoppiamenti distruttivi tra gli elementi.

Facciamo un esempio: consideriamo un codificatore montato su un albero per misurare la velocità angolare dell'albero stesso. La connessione tra albero e codificatore è necessaria al codificatore per adempiere alla sua funzione. E' desiderata e prevista pertanto si può parlare di accoppiamento costruttivo. Un fenomeno fisico però insorge: l'eccentricità dell'albero nella sua rotazione. Tale eccentricità è inevitabile e i comportamenti derivanti da tale eccentricità possono disturbare le altre parti del sistema. Supponiamo per esempio che il codificatore operi alla stessa frequenza dell'errore causato dall'eccentricità. Ci può essere interferenza tra i due segnali che porta ad un non corretto funzionamento del codificatore.

In fase di progettazione è pertanto cruciale predire le interazioni tra i parametri di progetto al fine di progettare un prodotto che funzioni correttamente e risponda alle esigenze che gli vengono richieste, anche attraverso la collaborazione con esperti di altre materie qualora non ci abbiano le competenze relative a tutte le discipline coinvolte nel progetto.

E' interessante riportare inoltre un articolo che riprende la teoria del design assiomatico di Suh applicando la metodologia entropica.

Nel **2008 S.Shokri e W.H.ElMaraghy** [128] estendono la classificazione proposta da Suh [121] aggiungendo la Reduced Combinatorial Complexity che quantifica l'incertezza della selezione, orientamento, e inserzione nell'assemblaggio utilizzando la teoria dell'entropia/informazione.

Gli autori riprendono le definizioni di complessità indipendente dal tempo suddivisa in due categorie: complessità reale e complessità immaginaria; e complessità dipendente dal tempo suddivisa nelle categorie: complessità combinatoria e periodica.

La complessità di assemblaggio può contenere complessità reale indipendente dal tempo quando i componenti e i fissaggi, così come i processi di assemblaggio non sono progettati correttamente. Può anche contenere la complessità immaginaria indipendente dal tempo, se l'operatore non possiede abbastanza addestramento o conoscenza nell'eseguire i compiti di assemblaggio. Se la sequenza di assemblaggio non è ben progettata inoltre l'assemblaggio può presentare una complessità combinatoria dipendente dal tempo causata dall'accumulo di eventi che portano ad un peggiore funzionamento delle attrezzature e del sistema. Analizzando il processo di assemblaggio ci si rende conto che esiste un altro tipo di complessità: la complessità combinatoria ridotta (Reduced Combinatorial Complexity) come rappresentato in figura 8.1.10. Questa complessità diminuisce come funzione del tempo a causa della continua riduzione nel numero di possibili combinazioni con il tempo. Nell'assemblaggio, il numero di parti/sotto-assemblaggi, fissaggi, punti di fissaggio disponibili, e orientamenti influisce sulla RCC. Al fine di ottenere un prodotto di qualità accettabile i componenti devono essere appropriatamente selezionati, orientati, e inseriti.

Continuando le operazioni di assemblaggio, il numero di parti dalle quali selezionare diminuisce e c'è un numero più basso di combinazione di selezioni. Pertanto assemblare un componente determina la riduzione del numero di punti di fissaggio. Dopo l'assemblaggio delle altre parti c'è solo un orientamento rimasto per la prima parte che deve essere assemblata. RCC pertanto è una funzione del tempo, in cui per tempo si intende il periodo nel quale una parte è assemblata al gruppo base o alle parti già assemblate. In altre parole il tempo rappresenta una fase dell'assemblaggio (o una percentuale nel completamento dell'assemblaggio) in cui una parte è assemblata (per ex. dallo 0% al 100%).

La RCC totale è una funzione della selezione, orientamento, e inserzione.

$$RCC_i = w_{s,i}H_{s,i} + w_{o,i}H_{o,i} + w_{in,i}H_{in,i}$$

in cui

$H_{s,i}$ è la complessità di selezione calcolata ad ogni passo dell'assemblaggio

$$H_{s,i} = - \sum_{i=1}^N p_{s,i} \log_2 p_{s,i}$$

dove

$p_{s,i}$ è la probabilità dell'appropriata selezione della parte i che deve essere assemblata

N è il numero totale di parti e fissaggi

$H_{o,i}$ è la complessità di orientamento calcolata ad ogni passo dell'assemblaggio

$$H_{o,i} = - \sum_{i=1}^N p_{o,i} \log_2 p_{o,i}$$

dove

$p_{o,i}$ è la probabilità dell'appropriata orientamento della parte i che deve essere assemblata

N è il numero totale di parti e fissaggi

$H_{in,i}$ è la complessità di orientamento calcolata ad ogni passo dell'assemblaggio

$$H_{in,i} = - \sum_{i=1}^N p_{in,i} \log_2 p_{in,i}$$

dove

$p_{in,i}$ è la probabilità dell'appropriata inserzione della parte i che deve essere assemblata

N è il numero totale di parti e fissaggi

Una volta misurate tutte le complessità di tutte le fasi si procede ad una normalizzazione

$$NRCC_i = \frac{RCC_i}{RCC_{max}}$$

in cui RCC_{max} è la complessità della fase 0 dell'assemblaggio, cioè quando il prodotto è finito.

La metodologia per il calcolo della complessità combinatoria ridotta di assemblaggio per ogni componente può essere pertanto così riassunta:

1. definire il numero totale di componenti da assemblare
2. si assume che allo step 1 la parte 1 sia assemblata. A questo punto calcolare le $H_{s,1}$, $H_{p,1}$ e $H_{in,1}$ tramite le rispettive equazioni
3. Calcolare RCC_1 per lo step 1, dalla prima equazione, e quindi $NRCC_1$
4. Allo step i , si assume che la parte i sia stata assemblata rispetto alle altre parti. Quindi per le prossime $N-i$ parti calcolare la complessità di selezione, orientamento, e inserzione.
5. Ripetere lo step 4 finché tutte le parti non sono assemblate.

Il calcolo di RCC consente di determinare quale fase o componente dell'assemblaggio ha un impatto maggiore sulla complessità di assemblaggio consentendo di fare utili considerazioni sulle fattibilità delle diverse sequenze di assemblaggio.

8.2 Complessità nell'assemblaggio

A valle della fabbricazione dei componenti ai fini della emissione del prodotto finito viene svolta l'operazione di assemblaggio. Così come fatto per il design, in questa sezione si vogliono raggruppare alcuni contributi di letteratura sulla complessità riferita a questa fase, numerose sono le pubblicazioni recenti su questo tema.

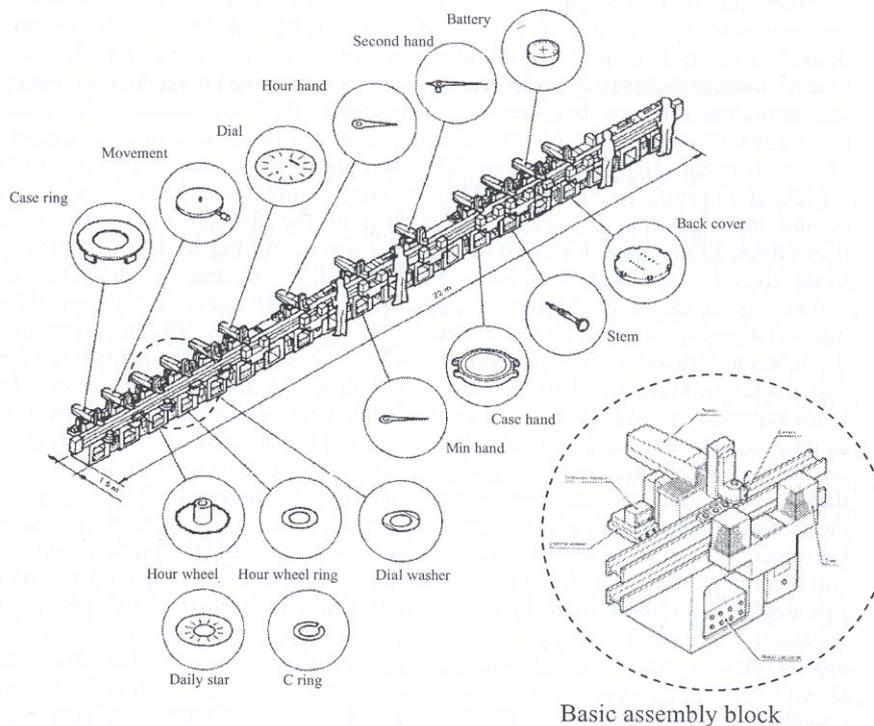


Fig. 8.2.1 Linea di assemblaggio automatico per orologi da polso [129]

8.2.1. Definizioni e contributi vari

La maggior parte degli autori che si sono occupati di complessità, si concentra prima sulla fase di fabbricazione dei singoli componenti rimandando la considerazione dell'assemblaggio, nonostante l'evidente importanza che ha nel processo di produzione del prodotto finito. Questo in quanto non essendo ancora risolta l'istanza della determinazione di un metodo di calcolo della complessità di un singolo componente, risulta prematuro concentrarsi su quella del loro assemblaggio, che rappresenta un livello "superiore" trattandosi di una fase a valle. L'importanza

della misura della complessità di assemblaggio è comunque indubbia e viene meglio spiegata nel paragrafo 8.2.2 dedicato ai recenti lavori a proposito del gruppo di ricerca del Prof. ElMaraghy.

Sono stati selezionati e si riportano di seguito alcuni tra i contributi giudicati più significativi riguardanti la complessità di assemblaggio, presentati in ordine cronologico.

Nel **1996 Michael Goldwasser & c.** [130] sono tra i primi a trattare il tema della misura della complessità di *assemblaggio* di un prodotto industriale.

Obiettivo del lavoro è comprendere quale tra le diverse sequenze di assemblaggio geometricamente fattibili sia quella ottimale per un dato prodotto. Non viene definita una vera e propria misura di complessità, ma individuati alcuni importanti elementi di cui tenere conto nella sua definizione.

L'uso di strumenti di valutazione di progetto, come ad esempio il Design For Assembly (DFA), ha portato ad una riduzione del numero di revisioni necessarie in fase di progettazione dovute ad incompatibilità fra progetto e processo d'assemblaggio. Un approccio più attivo potrebbe richiedere l'utilizzo del DFA per la pianificazione dell'assemblaggio durante la fase di ingegnerizzazione del processo. Un aspetto interessante del DFA è la valutazione dei processi di produzione e assemblaggio per ogni componente del prodotto, basata su un'analisi soggettiva della complessità di forma e tenendo conto del metodo di codifica delle parti. Integrando o eliminando parti per ottimizzare l'assemblaggio, inevitabilmente si creano componenti più complessi e sono quindi richiesti processi di inserzione più complessi. L'accertamento complessivo richiede che il tempo e il costo di produzione siano minimizzati, ma questo comporta evidentemente un compromesso tra ammontare delle spese manifatturiere, operazioni di assemblaggio e numero di parti.

Per valutare un prodotto in relazione a tutti questi aspetti di progetto, è perciò importante considerare la complessità in molti modi diversi. Sarebbe conveniente a questo scopo effettuare il calcolo della complessità di forma in modo automatizzato usando dati estratti dal modello CAD, per ridurre la soggettività e consentire un collegamento diretto tra un componente ed il suo metodo ideale di produzione. Uno schema di classificazione adatto consentirebbe anche il riutilizzo di parti esistenti ed una riduzione nella varietà, sia del prodotto sia del mix produttivo, rendendo possibile raffronti e analogie fra i componenti. Dovrebbe essere considerata anche una misura della complessità per l'assemblaggio e configurazione del prodotto. L'obiettivo finale è adempiere alle funzioni del prodotto creando il progetto più semplice.

Il ruolo dell'analisi di complessità è allo scopo di trovare un ottimo equilibrio fra capacità manifatturiera e operazioni di assemblaggio considerare il concetto di complessità nei termini del Design For Assembly e dividerlo su due livelli: complessità di componente e complessità di assemblaggio.

- **Complessità di componente:**

La complessità di componente include quegli aspetti del progetto che si riferiscono direttamente ad ogni componente e non direttamente influenzati dalla sequenza di assemblaggio.

Questi sono:

- *Complessità manifatturiera, C_m* . Il tipo, numero e la difficoltà di operazioni manifatturiere sono direttamente riferiti alla geometria di un componente. La metodologia DFA esistente richiede che il progettista svolga una soggettiva classificazione di forma secondo tipologie di forma definite (rotazionale, prismatica ecc.) e riduca la complessità limitando il numero e il tipo di caratteristiche addizionali. Sebbene il numero di parti sia ridotto per migliorare l'assemblaggio, questa riduzione può dare però luogo a componenti più complessi, richiedendo nuovi materiali o metodi di produzione.
- *Complessità di processo, C_p* Questa nozione della complessità è necessaria per quantificare la difficoltà associata con allineamento, inserimento ed operazioni di handling di parti singole o pre-assemblate. Tecniche di DFA corrente offrono un sistema di valutazione di questi aspetti di assemblaggio per evidenziare componenti che presentano particolari problemi.

- **Complessità di assemblaggio:**

La complessità di assemblaggio include quegli aspetti di un progetto che colpiscono l'efficienza della sequenza di assemblaggio. Può essere pertanto distinta in:

- *Complessità strutturale, C_{st}* in questo caso l'analisi DFA non tiene conto della configurazione di un prodotto nei termini della sua struttura se non per eliminare parti non-funzionali. Il tipo di struttura ha comunque un grande impatto sul processo principale di assemblaggio: una gerarchia troppo "profonda" necessita di maggiori operazioni per rintracciare le parti, depositarle e ispezionarle. Le operazioni di handling delle parti diventano quindi più difficili.
- *Complessità di sequenza, C_s* : il numero di operazioni richieste per assemblare un prodotto è direttamente influenzato dalle decisioni fatte a livello di progetto, così come la sequenza di assemblaggio scelta. Il numero di operazioni di inserimento è direttamente

proporzionale al numero di componenti, ma una sequenza di assemblaggio mal definita può incorporare molte operazioni non necessarie.

Prima di definire una scala per la complessità è necessario considerare come interagiscono i diversi tipi di complessità ed identificare i fattori dai quali dipendono. Il modello proposto è basato sui seguenti postulati:

- un elevato numero di semplici componenti crea assemblaggi complessi e perciò estremamente costosi
- un piccolo numero di componenti complessi produce un assemblaggio complesso ed estremamente costoso.

E' implicito in queste assunzioni il fatto che, nonostante la complessità dei componenti individuali, più alto è il numero di parti, più complesso è l'assemblaggio, ma questa crescita non è continua. Pur aumentando il numero di pezzi l'assemblaggio giunge infatti ad un punto in cui l'incremento di complessità subisce un arresto.

Al fine di ridurre la complessità e quindi il costo di un assemblaggio occorre programmare:

- Minimo numero di direzioni: il costo di una sequenza di assemblaggio è uguale al numero di direzioni che sono usate. Infatti ogni direzione richiede un differente tipo di movimento per un robot, ed è molto più efficiente avere robot che hanno il minor numero possibile di gradi di libertà.
- Minor numero possibile di ri-orientamenti: il costo di una sequenza di assemblaggio è uguale al numero di ri-orientamenti necessari mentre si svolge la sequenza. In molte situazioni produttive il costo principale di un robot sta nell'orientarlo al fine di eseguire un certo tipo di movimento e, una volta che sia orientato, è relativamente poco costoso produrre parecchi movimenti di quel tipo.
- Minor numero possibile di fasi non lineari: una fase è lineare se uno dei due sub-assemblati è una parte singola. Il costo di una sequenza di assemblaggio è proporzionale al numero di fasi non lineari.
- Minima profondità di una sequenza di assemblaggio: se rappresentiamo l'assemblato con una struttura ad albero, il costo della sequenza di assemblaggio è proporzionale alla profondità dell'albero che deve pertanto risultare minima.
- Minimo numero di parti rimosse: questa misura è specifica per l'individuazione della parte chiave. La misura è il numero delle parti che sono rimosse prima di isolare la parte chiave.

Queste considerazioni sono molto utili per tentare di ottimizzare la sequenza delle operazioni di assemblaggio, diminuendone la complessità e il costo.

Nel 1998 *Carlos Ramos, Joao Rocha, Zita Vale* [131] “On the complexity of precedence graphs for assembly and task manufacturing” affrontano il tema della complessità dell’assemblaggio e fabbricazione di un prodotto individuando un metodo che consente il calcolo del numero di pianificazioni possibili su N operazioni, avendo a disposizione un certo numero di macchine nell’ambito di un processo di assemblaggio o fabbricazione. La complessità viene individuata non tanto nel numero di operazioni coinvolte quanto nella topologia delle precedenze tra le operazioni.

Le operazioni vengono rappresentate in un grafo orientato dove i nodi sono le operazioni necessarie al processo e l'ordine degli archi orientati che li collegano indica la sequenza. Potremo avere quindi rami di operazioni interamente in serie, o in parallelo come in figura 8.2.1.

Se sono permessi parallelismi fra operazioni, più pianificazioni di processi possono essere equivalenti, ad esempio se abbiamo 3 operazioni {op 1, op 2, op 3}, con le seguenti relazioni di precedenza: op1 e op2 prima di op 3 e 3 macchine disponibili, in tal caso i processi {op1, op2, op3} e {op2, op1, op3} sono di fatto uguali. Tuttavia, se abbiamo solo una macchina queste pianificazioni sono diverse e possono portare a diversi tempi di produzione e quindi a diversi costi, ad esempio se le operazioni op2 e op3 richiedono il medesimo utensile x e l'operazione op1 richiede un diverso utensile allora il secondo piano risulta più costoso perché richiede un cambio dell'utensile in più per la macchina con conseguente perdita di tempo.

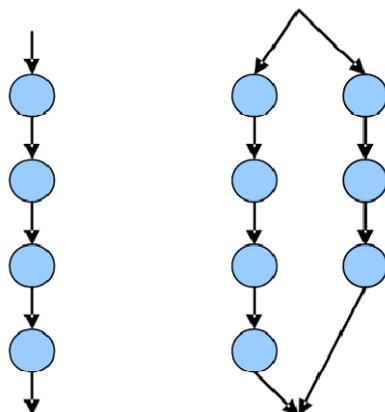


Fig.8.2.1 a) Operazioni di assemblaggio in serie b) Rami paralleli di operazioni

131]

Consideriamo adesso 4 operazioni opA, opB, opC e opD (Fig.8.2.2) si avranno sei possibili programmi. Volendo calcolare il numero di piani possibili cerchiamo di espandere il ramo di sinistra su quello di destra, avremo quindi 3 posizioni dove sistemare le altre operazioni del ramo parallelo. Quindi in genere se abbiamo N operazioni in un ramo avremo N+1 posizioni in cui sistemare le altre operazioni del ramo parallelo, quindi sarà necessario distribuire le m operazioni di un ramo nelle n+1 operazioni del ramo parallelo. Ad esempio ecco cosa succede se m operazioni ($0 < m < 7$) in cui opi precede $opi+1$ vengono distribuite in n blocchi.

Sono definiti:

piano (branch): sequenza di operazioni costituita da un certo numero di diramazioni

m numero operazioni del I° branch

n numero operazioni del II° branch

i numero dei blocchi di operazioni

n + 1 n° di posizioni (slot) in cui collocare i blocchi di operazioni (blocks) che possono essere eseguite in serie o in parallelo

C_i^{n+1} numero di possibili combinazioni

per n + m operazioni il numero complessivo di combinazioni di operazioni è pari a:

$$\sum_{i=1}^{\min(n+1,m)} C_i^{n+1} C_{i-1}^{m-1}$$

questo numero esprime la complessità del processo di assemblaggio.

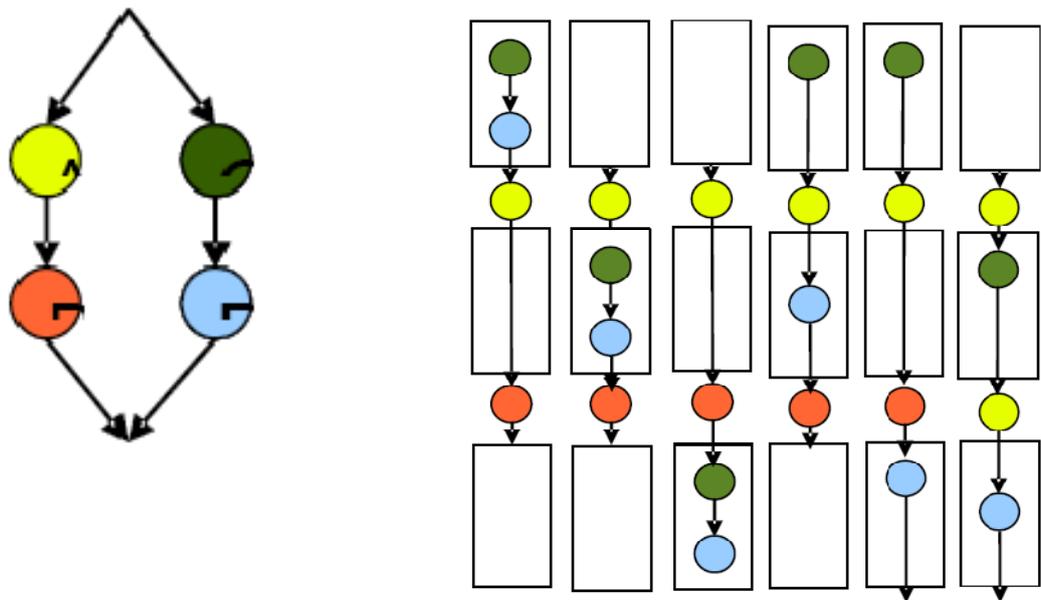


Fig.8.2.2 Possibili sequenze per un grafico precedente con 2 rami paralleli [131]

Viene quindi sviluppato un software che consente di calcolare automaticamente il valore della complessità, che è determinante nella scelta del processo di assemblaggio ottimale. Dai risultati si evince che i problemi principali non nascono dal tempo di processamento dei componenti da parte delle macchine, quanto dai tempi di cambio utensile e di set-up delle macchine, che devono pertanto essere minimizzati.

Considerazioni sul metodo di Ramos, Rocha, Vale:

L'articolo di Ramos, Rocha, Vale risulta applicabile a qualsiasi schema di produzione, e potrebbe essere molto utile per la valutazione di una complessità di processo, ma per processi poco schematizzabili ed ugualmente completi, tale metodo di valutazione risulta di difficile applicazione e pertanto poco utile.

Punti di forza:

- utilizza dati del sistema analitici e oggettivi
- applicazione valida per diversi settori e prodotti
- facile interpretazione dei risultati

Punti di debolezza:

- non definisce direttamente un indice di complessità quanto il numero di operazioni di assemblaggio richieste per la produzione del prodotto
- applicazione limitata alla parte di produzione di assemblaggio.

Nel *2002 Carlos Rodriguez Toro & c.* [132] presentano una introduzione dei concetti di complessità a supporto di una progettazione orientata all'assemblaggio al fine di guidare il progettista nella creazione di un prodotto con il più efficace equilibrio di difficoltà di produzione e assemblaggio.

La complessità gioca un ruolo chiave nel conseguimento del miglior progetto che non tenga solo in conto la pianificazione di assemblaggio ma anche la selezione dei processi manifatturieri più adatti.

Vengono riviste alcune delle correnti metodologie di definizione e misura della complessità e viene analizzata una possibile integrazione di queste con la DFA (Design For Assembly).

La complessità nella progettazione può essere classificata secondo le seguenti categorie: geometria, topologia e assemblaggio.

La geometria del componente implica le sue dimensioni e forme (angoli, superfici ecc.), la topologia è riferita alle feature (caratteristiche) del pezzo anche al fine di raggruppare i componenti simili in gruppi al fine di pianificare la produzione secondo i criteri della Group Technology e l'assemblaggio riguarda le operazioni che vengono svolte sui componenti alla fine della fabbricazione del prodotto finito.

Gli autori riprendono la teoria del design assiomatico di Suh, e definizioni fornite da altri autori quali Calinescu [8,10] e Tang [1].

L'attuale progettazione supportata da strumenti CAD tende ad essere più orientata ai componenti che non a trattare il prodotto come un tutt'uno. Una larga parte di tutti i costi di prodotto sono determinati nella fase di progettazione e molto di questo costo è sostenuto nella fase di assemblaggio. Ricerche dimostrano che i prodotti industriali sono ancora progettati con almeno il 50% di parti in eccesso che richiedono procedure di assemblaggio più complesse del necessario. Il DFA permette di ridurre il numero di componenti, migliora la qualità del prodotto e minimizza i problemi di assemblaggio. Uno degli aspetti della metodologia DFA è una valutazione dei processi manifatturieri richiesti per ogni componente del prodotto, basata su una analisi soggettiva della complessità di forma, in accordo con la codifica delle parti. Quando parti vengono eliminate o integrate al fine di ottimizzare l'assemblaggio, inevitabilmente sono richiesti componenti più complessi e processi più complessi di inserimento.

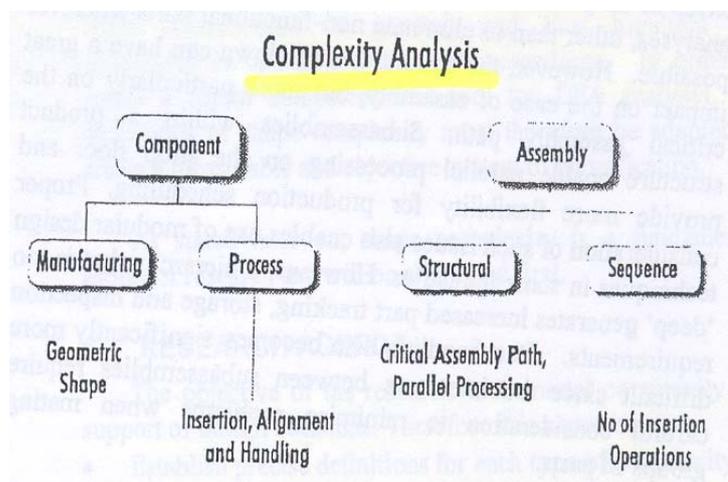


Fig. 8.2.3 Diversi fattori di complessità per componenti e assemblati [132]

Possono essere individuati due tipi di complessità:

Complessità di componente:

include quegli aspetti del progetto che si riferiscono direttamente a ciascun componente e non sono direttamente condizionati dalla sequenza di assemblaggio, cioè:

- Complessità manifatturiera C_m – il tipo, numero e difficoltà di operazioni manifatturiere è direttamente relativo alla geometria del componente
- Complessità di processo C_p – questa complessità è definita per quantificare la difficoltà associata con l'allineamento, inserzione e operazioni di movimentazione su parti individuali o sub-assemblati.

Complessità di assemblaggio:

include quegli aspetti di un progetto che condizionano l'efficienza della sequenza di assemblaggio cioè:

- Complessità strutturale C_{st} – configurazione di un prodotto in termini della sua struttura di prodotto, cioè gruppi, sottogruppi ecc.
- Complessità di sequenza C_s – numero di operazioni richieste per assemblare un prodotto direttamente influenzato dalle decisioni prese nella fase di progettazione. Il numero di operazioni di inserzione è direttamente proporzionale al numero di componenti, se la sequenza è male definita può incorporare molte operazioni non necessarie.

Si possono fare le due seguenti affermazioni di base:

- Un gran numero di componenti semplici porta ad una complessità di assemblaggio e quindi a costi elevati
- Un basso numero di componenti complessi porta anche ad una complessità di assemblaggio e a costi elevati.

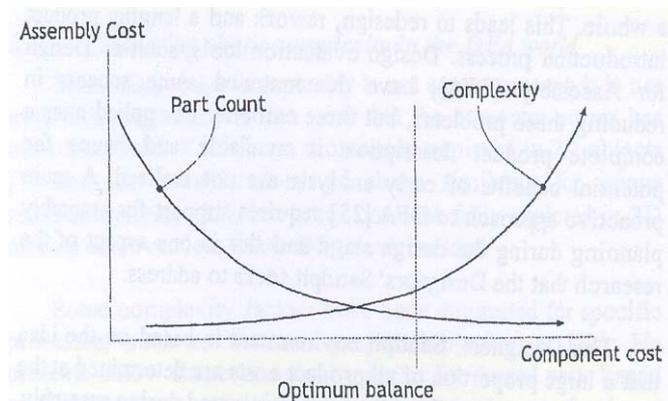


Figura 8.2.4 influenza della complessità del componente e del numero dei componenti sul costo [132]

Al crescere del numero di componenti cresce la complessità di assemblaggio, ma non si tratta di una crescita continua. L'assemblaggio raggiunge un punto di stagnazione di complessità come mostrato in figura:

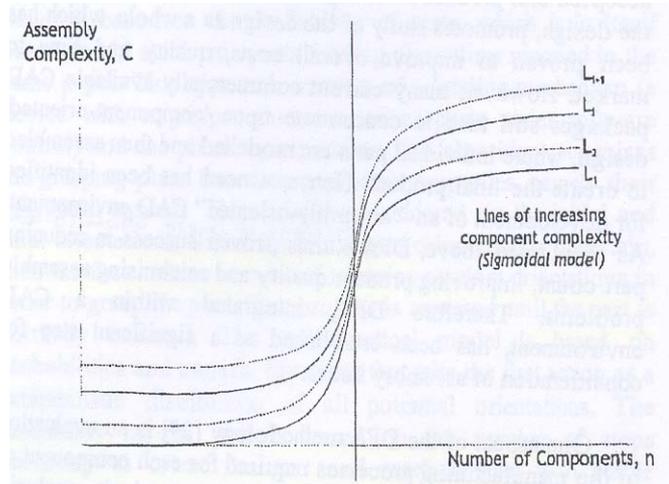


Figura 8.2.5. Complessità totale di assemblaggio versus numero di componenti [132]

Il punto di flesso rappresenta una saturazione della complessità di assemblaggio, cioè la complessità di assemblaggio aumenta al crescere del numero di parti del prodotto, quindi dopo il punto di saturazione, indifferentemente dal numero di componenti, l'assemblaggio tende a presentare un comportamento stabile.

Viene definita una *complessità totale* la combinazione di diversi tipi di complessità:

$$C_T = \frac{w_1 C_m + w_2 C_p + w_3 C_{st} + w_4 C_s}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4}$$

in cui:

$C_m = f(\text{geometria, materiale, strumenti, processo, dimensione del lotto})$

$C_p = f(\text{geometria})$

$C_{st} = f(n, \text{livelli nella gerarchia, numero di subassemblati, massimo numero di componenti/subassemblati o numero di diramazioni o livelli di precedenza})$

$C_s = f(n, \text{numero di operazioni di assemblaggio})$

w pesi

Dall'esame dei componenti tramite il DFA si possono distinguere tre categorie:

- A la superficie di involuppo del componente può essere considerata un solido di rivoluzione

- **B** la superficie di involuppo del componente può essere considerata un prisma rettangolare o cubico
- **C** componenti a sezione piatta o sottile.

Nell'ambito di queste categorie, i componenti sono quindi classificati in una scala da 1 a 5 in accordo con il numero e tipo di feature e la complessità delle superfici.

Il valore della complessità così definito può essere utilizzato come indicazione per il progettista ai fini di trovare la soluzione progettuale più semplice e corretta che corrisponde ad un minimo di complessità pur nel rispetto dei requisiti funzionali.

Questo metodo per quanto efficace, dimostra la natura vaga e soggettiva della classificazione delle forme e quindi nell'automatizzare le procedure di Design For Assembly.

Nel 2002 *G.Boothroyd, P Dewhurst, W.Knight*. [133] si pongono l'obiettivo di estendere la metodologia di valutazione della complessità tecnologica di prodotto applicata a un singolo componente ad un prodotto assemblato.

Viene proposta una formula molto semplice per calcolare la complessità di assemblaggio:

$$C_{\text{assemblaggio}} = \sqrt{(Nt + Np + Ni)}$$

in cui:

Nt è il numero delle tipologie diverse di parti coinvolte nell'assemblaggio (ad esempio il numero di ciascuna delle diverse tipologie di viti utilizzate in una data operazione di assemblaggio)

Np è il numero totale di componenti coinvolti nell'operazione di assemblaggio (ossia il numero complessivo di componenti di un determinato tipo sommati a quelli di altre tipologie: se ad esempio in un montaggio sono coinvolti 10 viti, 2 piastre di una determinata tipologia, 2 piastre di un'altra tipologia, allora Np è la loro somma totale 14)

Ni è il numero delle interfacce di collegamento delle varie parti in gioco con gli altri componenti (se ad esempio una piastra è collegata ad un'altra tramite due viti il numero che ne consegue è tre, il quale va a sua volta sommato con il valore di tutte le altre interfacce di collegamento di tutti i pezzi coinvolti nell'assemblaggio).

Questa metodologia di calcolo di complessità è semplice, ma completa in quanto considera l'intero numero di parti in gioco e come queste parti vengono collegate tra loro.

Considerazioni sulla complessità di assemblaggio di Boothroyd & c.

Il calcolo della complessità consente di ottimizzare la sequenza di assemblaggio, quindi fornisce importanti indicazioni a progettista e industrializzatore. L'autore utilizza un modello entropico che, come già sottolineato più volte, certamente rappresenta al momento la modalità più universalmente riconosciuta ed efficace per i calcoli di complessità per quanto riguarda la fase di fabbricazione.

Sempre nel **2002** si registra un altro significativo contributo finalizzato al calcolo della complessità di assemblaggio. **Barnes, Jared e Swift** [134] propongono quattro indici per valutare le sequenze di assemblaggio e scegliere quella migliore fin dalle fasi di sviluppo del prodotto.

Gli indici che propongono si riferiscono ad una certa fase del processo di sviluppo del prodotto e pertanto al valore assunto in quel momento dai diversi indicatori presi sui quali si basa il calcolo:

$$\text{Indice di inserzione} = \frac{p + w}{m + n}$$

in cui

p è il numero di inserzioni di assemblaggio part-to-partial in qualsiasi assemblaggio

$$\text{Indice di stabilità} = \frac{x}{n + 1}$$

in cui

x è il numero di maschere e attrezzi di fissaggio usati nell'assemblaggio

n è il numero di sotto-assemblaggi nell'assemblaggio

$$\text{Indice di difficoltà} = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{q}$$

in cui

m è il numero di componenti nell'assemblaggio

y_i è un indice ripreso dal metodo Design-For-Assembly Lucas [135] calcolato per qualsiasi assemblaggio dove $i=1, \dots, m$

$$\text{Indice di complessità} = \frac{q}{m+n}$$

in cui

q è il numero di tutte le operazioni definite nell'assemblaggio

L'indice di complessità rappresenta il numero di operazioni necessarie per inserire e assicurare una parte all'assemblaggio parziale per introdurre poi una nuova parte. Così il numero medio di processi per fase di assemblaggio determina la complessità totale di fabbricazione del prodotto. Il valore minimo dell'indice è pari a 1 in quanto almeno una singola operazione viene sempre richiesta per l'inserimento di ciascun componente.

In base a verifiche sperimentali in particolare su prodotti elettromeccanici e alla interpretazione statistica di questi risultati si possono individuare dei valori minimi e massimi entro i quali gli indici devono essere contenuti per garantire un buon assemblaggio di seguito rappresentati.

$$\text{Indice di inserzione} \quad 1 \leq \frac{p+w}{m+n} \leq 1,2$$

$$\text{Indice di stabilità} \quad 1 \leq \frac{x}{n+1} \leq 1,4$$

$$\text{Indice di difficoltà} \quad 1 \leq \frac{\sum_{i=1}^{i=m} y_i}{q} \leq 2$$

$$\text{Indice di complessità} \quad 1 \leq \frac{q}{m+n} \leq 1,4$$

Il valore degli indici calcolati per una certa sequenza di assemblaggio definita durante il processo di sviluppo del prodotto consente quindi di valutare la bontà della sequenza stessa e portare eventuali modifiche in fase di progettazione del prodotto.

Un significativo lavoro sulla complessità di assemblaggio è quello di **H. Shibata & c.** del 2003 [136] che affrontano il problema della riduzione dei difetti del processo di assemblaggio, problema strettamente connesso, secondo la loro teoria, alla complessità insita nell'assemblaggio stesso.

Gli autori propongono in questo articolo un metodo che, tramite la complessità di assemblaggio, riesca a prevedere il quantitativo di difetti in tale processo. In particolare essi

inglobano due fattori di complessità di origine diversa in un'unica formula ed attraverso un processo di regressione lineare giungono alla formulazione finale.

Il fattore di complessità viene calcolato secondo due modalità diverse, la prima definisce un *coefficiente di complessità riferito al processo e ai tempi di esecuzione dell'assemblaggio*:

$$Cf_{pi} = TM_i - t_{ai}N_{ai}$$

in cui

i indica la fase di assemblaggio.

Cf_{pi} è il coefficiente di complessità basato sul processo

TM_i è il tempo totale di assemblaggio

t_{ai} è il tempo di assemblaggio limite adattabile

N_{ai} è il numero di operazioni per l' i -esimo passo dell'assemblaggio.

L'idea alla base di questa metodologia è la considerazione che il processo di assemblaggio è formato da tante fasi, formate a loro volta da "elementi di lavoro" quali ad esempio: l'operazione in cui il pezzo viene afferrato, la movimentazione nella macchina di assemblaggio, l'operazione di spinta, di sollecitazione, di curvatura ecc..

Gli autori includono nella stima del tempo totale di assemblaggio anche il tempo relativo alle operazioni di non assemblaggio ed il numero totale delle operazioni.

Il tempo totale di assemblaggio TM_i è la somma dei tempi di assemblaggio relativi alle singole fasi del processo.

Il tempo di assemblaggio limite adattabile è equivalente al tempo di assemblaggio minimo per l' i -esima fase di assemblaggio a cui viene attribuito il valore di 2 secondi come suggerito anche da altri autori, che è comunque il tempo minore tra tutte le fasi di assemblaggio di un determinato prodotto .

Infine il numero di operazioni N_{ai} è riferito al numero di operazioni formanti una singola i -esima fase del montaggio.

Gli autori in seguito riferiscono il fattore così trovato ad una formula più complessa per prevedere la quantità di difetti generata dal processo di assemblaggio.

Tramite CF è possibile misurare le prestazioni dell'impianto produttivo in termini di:

$$QCP = \frac{(CF)^k}{DPU} = \frac{(CF)^{1.3}}{DPU}$$

in cui:

QCP Quality Control Performance

DPU difetti per unità

Quindi la complessità è connessa alla prestazione produttiva e utilizzata per la sua misura.

In base alla seconda modalità di calcolo il *coefficiente di complessità è riferito alla progettazione*. Gli autori propongono l'utilizzo di questo secondo coefficiente per ovviare agli errori nella previsione dei difetti di assemblaggio generati dal coefficiente basato sul processo e perché esistono complessità di assemblaggio non rappresentabili solamente in termini del tempo di assemblaggio.

La formula di tale coefficiente di complessità è riportata di seguito:

$$Cf_{Di} = \frac{K_D}{D_i}$$

in cui:

K_D è un coefficiente arbitrario per la calibrazione rispetto alla complessità basata sul tempo e D_i è dato dalla seguente formula:

$$D_i = \frac{\sum d_i}{N_{ai}}$$

in cui

N_{ai} è il numero delle operazioni di una i-esima fase del processo di assemblaggio e

d_i è l'indice di facilità dell'assemblaggio, che si determina come segue:

$$d_i = 100 - (f_{i1} + f_{i2} + f_{i3})$$

dove

f_i indica la difficoltà di acquisire e orientare la parte per l'assemblaggio

f_2 indica le caratteristiche e quindi difficoltà di assemblaggio della parte

f_3 indica le caratteristiche e quindi difficoltà di assemblaggio della parte nel pezzo base

Il valore di questi tre aspetti di difficoltà deve essere stabilito dai progettisti stessi ed è quindi frutto di *valutazioni soggettive*.

Il metodo proposto è stato applicato industrialmente da Yamagiwa nel 1984 nell'ambito di un progetto per la Sony chiamato "Design for Assembly Cost-Effectiveness".

Secondo le valutazioni fatte da Yanagisawa, se D_i ha un valore compreso tra 50 e 70 punti, il processo di assemblaggio richiede un certo grado di abilità; se D_i è più alto di 70 punti, il progetto dell'assemblaggio è considerato ottimale, mentre se è minore di 50 punti c'è bisogno di apportare delle modifiche al progetto in questione. Più è alto D_i , più bassi sono i difetti per unità. L'indice di facilità di assemblaggio d può andare da 0 (assemblabilità scadente) a 100 (assemblabilità eccellente).

Considerazioni sulla complessità di assemblaggio di Shibata & c.

La metodologia è legata a valutazioni soggettive e non viene specificato quale è il range all'interno del quale scegliere i valori di f_1 , f_2 e f_3 relativi ai tre aspetti della facilità di assemblaggio, né sulla base di quali criteri viene assegnato il valore arbitrario del coefficiente di calibrazione K_d .

Ciononostante, risulta significativa in quanto tenta una quantificazione del problema fornendo importanti spunti per il calcolo della complessità di un prodotto assemblato.

Di seguito vengono riportati alcuni significativi articoli che applicano il modello entropico al calcolo della complessità di assemblaggio.

Nel **2005 Thorsten Blecker e Nizar Abdelkafi** [137] definiscono la complessità di assemblaggio fornendo due definizioni di complessità all'interno di due ambiti: business administration e engineering management.

Complessità secondo un approccio teorico di sistema:

La complessità è un attributo del sistema considerato costituito da elementi o parti (oggetti, sistemi di ordine più basso, sottosistemi) che sono connessi uno all'altro attraverso relazioni. Per

definire la complessità, gli elementi e le relazioni del sistema devono essere valutate in accordo con tre variabili che sono: il numero, la diversità, e la varietà degli stati. Infatti più elevato è il numero di elementi del sistema e le loro relazioni, e più eterogenei sono gli elementi e più elevata è la complessità. La varietà degli stati esprime l'instabilità del sistema e indica il suo comportamento dinamico nel tempo.

Complessità come entropia del sistema:

Complessità, incertezza e informazione sono legate una all'altra. Infatti al fine di ridurre la complessità di un sistema possiamo semplificarlo permettendo alcuni gradi di incertezza nella sua descrizione. Questa perdita di informazione che è necessaria per ridurre la complessità del sistema a un livello gestibile è espressa in incertezza. Come l'incertezza cresce il sistema diviene più complesso in quanto è richiesta più informazione per descrivere e controllare ciascuno dei suoi stati. La misura dell'incertezza di un sistema è l'entropia introdotta da Shannon che pertanto fornisce una misura quantitativa della complessità.

Con riferimento alla seconda definizione, gli autori introducono una entropia totale di intero processo di assemblaggio che è la somma delle entropie generate da ogni processo j sulla base della quale è possibile valutare sequenze alternative di assemblaggio, modificando il prodotto già in fase di progettazione in un'ottica di Design For Assembly (DFA).

$$H = -\frac{1}{VT^n} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{n_j} T_{ij} v_{jk} p_{jk} \log_2 p_{jk}$$

in cui

n numero di processi nell'intero processo di assemblaggio

j indice del processo o modulo

k indice delle varianti del modulo che possono essere assemblate al processo j

M_j famiglia di moduli che possono essere assemblati al processo j

M_{jk} una variazione di modulo che può essere assemblata al processo j

T_{ij} tempo di assemblaggio della variante di modulo M_{jk}

n_j numero totale di varianti di modulo che possono essere assemblate al processo j

v_{jk} valore aggiunto dovuto all'assemblaggio della variante di modulo k al processo j

p_{jk} probabilità di selezione della variante di modulo M_{jk}

La misura della complessità consente di dimostrare la insufficienza del principio di differenziazione ritardata del prodotto in base al quale è sempre meglio assicurare la varietà del prodotto in fase avanzata piuttosto che all'inizio del processo. Occorre invece valutare in ogni

specifico caso che sequenza di assemblaggio convenga utilizzare e se conviene assemblare i moduli base del prodotto in una fase iniziale del processo piuttosto che in una finale.

Nel 2006 *T.Zhang e J.Efstathiou* [138] basandosi su una misura entropica della complessità definita nel precedente lavoro dallo stesso autore, focalizzano l'attenzione sulla Mass Customization, come strategia di produzione che comprende l'abilità di fornire prodotti progettati individualmente e servizi specifici ai clienti nell'economia del mercato di massa.

L' MC può partire con uno stadio di produzione di massa e finire con una fase di personalizzazione al cliente. Le differenze principali da un sistema MC ad un altro dipendono dal livello di personalizzazione del cliente, ovvero dal posizionamento delle richieste del cliente (e quindi l'inizio della fase di personalizzazione) all'interno del processo di produzione.

Viene individuata la complessità di una linea di assemblaggio push/pull finalizzata alla personalizzazione del prodotto per il cliente, ovvero un sistema di Mass Customization (MC), ultima evoluzione dei paradigmi logistici di produzione.

Possiamo definire cinque strategie di MC:

1. post-distribuzione : ogni modifica personale del prodotto è fatta fuori dalla produzione a carico del cliente
2. distribuzione su ordinazione: il cliente ha diverse opzioni al punto di consegna
3. assemblaggio su ordinazione: il processo di produzione viene terminato con l'assemblaggio di un prodotto personalizzato su richiesta del cliente prendendo pezzi di magazzino considerati materie prime per l'ultima fase d'assemblaggio
4. fabbricazione su ordinazione: l'unico magazzino tenuto è quello delle materie prime
5. progettazione su ordinazione: non viene tenuto magazzino e il cliente è coinvolto fin dalla progettazione.

Volendo definire una linea MC vediamo che normalmente è divisibile in tre elementi:

- linea di assemblaggio push
- magazzino dei componenti
- linea di assemblaggio pull

Nella prima gli elementi vengono assemblati per creare componenti costruttive di base in lotti quantificati tramite previsioni di mercato, vengono poi sistemati in un magazzino che funge da buffer fra la produzione di massa e la personalizzazione, e in fine vengono assemblati su richiesta del cliente. I parametri fondamentali di un sistema push/pull sono:

- r : numero di posizioni nella linea d'assemblaggio push

- q: numero di posizioni nella linea d'assemblaggio pull
- m: numero di varianti nella linea d'assemblaggio push, ovvero il numero di varianti nel magazzino
- b: dimensione dei lotti nella linea d'assemblaggio push
- n: numero di varianti nella linea d'assemblaggio pull richieste dal cliente
- s: numero di posizioni nel magazzino

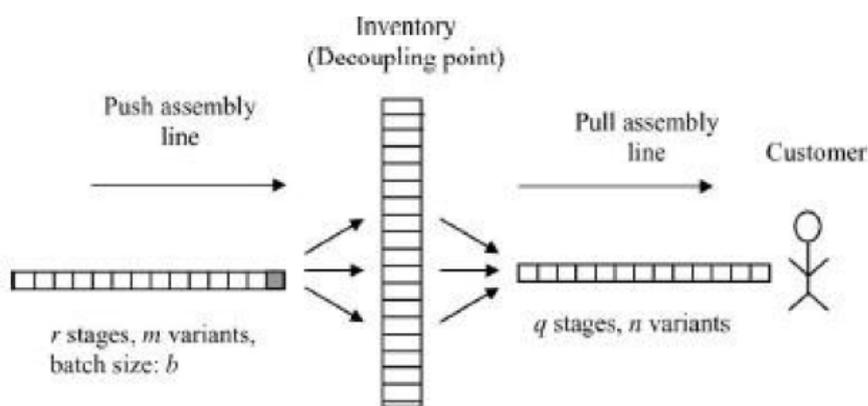


Fig. 8.2.6 Layout schematico di un sistema manifatturiero MC 137]

Viene ripresa la nota formula:

$$H_S = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{S_i} p_{ij} \log_2 p_{ij}$$

in cui

M è il numero di risorse

S_i è il numero di stati programmati per la i-esima risorsa

p_{ij} è la probabilità della risorsa i di essere nello stato j

Nel caso di un'azienda produttiva:

M può essere il numero delle macchine

S_i il numero di prodotti che devono essere processati da ogni macchina

Pertanto un sistema flessibile in grado di condurre diversi tipi di lavorazione su molte diverse macchine (per esempio un "job shop") ha una alta complessità strutturale, mentre layout cellulari con relativamente pochi lavori presentano una complessità strutturale più bassa.

Un sistema produttivo per la personalizzazione di massa del prodotto è costituito da 3 parti consecutive: 1. linea di assemblaggio “push”, 2. magazzino, 3. linea di assemblaggio “pull” come si vede in fig.6.4.3. La linea push comporta una ottimizzazione della produzione, in accordo con l’obiettivo di una migliore utilizzazione delle risorse piuttosto che della soddisfazione del cliente. La linea “pull” è guidata dalle richieste dei clienti rispetto al numero di prodotti che vengono processati e al termine di consegna. Il cliente “tira” i prodotti di cui ha bisogno nella quantità e tempi che vuole. Il magazzino ha il ruolo di scorta tampone tra la linea “push” e la linea “pull”. Molti prodotti semi-finiti si spostano dalla prima alla seconda e sono conservati nel magazzino prima di essere personalizzati. Il magazzino è pertanto il punto di disaccoppiamento in cui i clienti vengono coinvolti e fornisce un tampone tra l’incertezza e variabilità della fornitura rispetto alla domanda.

Gli autori definiscono le complessità specifiche relative a queste tre parti della catena di produzione, basandosi su una misura di tipo entropico.

La *complessità delle linea di assemblaggio “push”* è legata all’incertezza dovuta alla posizione del lotto nella linea:

$$H_{push} = H_1 + H_2$$

Sulla base di questi parametri si può dimostrare che la *complessità della linea push* è:

$$H_{push} = - \sum_{i=1}^b p_i \log_2 p_i - \sum_{j=1}^m p_j \log_2 p_j$$

ovvero la complessità necessaria a processare le m varianti di prodotto di un lotto di dimensioni b.

Si dimostra inoltre che la complessità massima di una linea push è:

$$H_{pushmax} = \log_2 b + \log_2 m$$

in cui

b è la lunghezza del lotto

p_i è la probabilità di ogni posizione di essere nello stato i.

Per quanto riguarda una linea pull invece consideriamo che la linea consista in q fasi, ognuno dei quali può assumere n diversi stati, ogni fase avrà una propria complessità, per cui la complessità della linea pull sarà data dalla somma delle complessità delle varie fasi della linea ovvero:

$$H_{pull} = - \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^n p_{ij} \log_2 p_{ij}$$

in cui

q è il numero di fasi della linea

n è il numero di possibili stati di ciascuna fase cioè il numero di varianti finali disponibili per il cliente.

La complessità della linea “pull” è massima quando le probabilità di ogni fase di trovarsi in qualsiasi degli n stati sono le stesse, quindi quando gli stati sono equiprobabili

$$H_{pullmax} = -qn \frac{1}{n} \log_2 \frac{1}{n} = q \log_2 \frac{1}{n} = q \log_2 n$$

La *complessità di magazzino* è legata alla strategia di gestione dello stesso che viene scelta:

1. il numero di varianti o prodotti che possono essere contenuti in ogni posizione
2. se le varianti sono localizzate in aree di immagazzinamento assegnate o sono localizzate casualmente
3. la probabilità di ciascuna posizione di essere vuota.

In genere $s > m$, cioè nel magazzino ci sono più posizioni che varianti e s influisce sulla complessità del magazzino più di m, quindi per ridurre la complessità occorre ridurre il numero di posizioni.

La complessità di magazzino può essere definita a partire dal numero di posizioni disponibili nel magazzino s, considerando che ciascuna possa trovarsi in uno dei 2 stati pieno o vuoto. Se il numero di possibili varianti (cioè il numero di prodotti semi-finiti) nel magazzino è m e p_i la probabilità di ogni posizione di essere vuota o piena si formula:

$$H_{stock} = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^m p_{ij} \log_2 p_{ij}$$

in cui

$$S_i = 2$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$H_{stock} = - \sum_{i=1}^s \left(\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} \right) = s$$

ovvero occorrono s bit per definire lo stato del magazzino.

La complessità potrà assumere diverse forme sulla base delle strategie d'inventario utilizzate. Vi sono tre tipi di magazzini: il magazzino delle materie prime (RM, raw materials), il magazzino dei componenti ancora da assemblare in prodotti (WIP, work in progress) e quello dei prodotti finiti. Sulla base del tipo di MC considerata il magazzino che prenderemo in considerazione sarà l'ultimo per quanto riguarda il primo tipo di MC, il primo per quanto riguarda le ultime due tipologie di MC, e il WIP per la più comune forma di MC ovvero quella spiegata in misura. Le strategie di inventario possono avere orizzonte temporale a breve, medio o lungo termine, a secondo del tipo di magazzino considerato, del rapporto coi fornitori e delle esigenze del materiale. Inoltre possiamo distinguerle in base a:

1. numero di varianti o prodotti che possono essere contenuti in ciascuna posizione dell'inventario
2. se per ogni variante, classe di prodotto o pezzo vi sono assegnate o meno aree del magazzino o sono posizionati casualmente
3. la probabilità che una posizione si vuoti.

Considereremo quindi quattro tipi di strategia:

- Strategia di allocazione dell'inventario 0 o anche ILS0 (inventori location strategy 0) è il caso in cui si tratta di una semplice variante di prodotto che viene richiesta in modo regolare e in quantità costanti. Avremo allora soltanto due stati per ogni posizione del magazzino con probabilità uguale a $1/2$. L'entropia sarà pertanto:
- ILS1: è il caso di m diverse varianti di componenti o prodotti allocate in altrettante aree assegnate, in questo caso la complessità sarà data dalla somma dell'entropia necessaria a descrivere lo stato di ogni posizione e di quella necessaria a definire l'allocazione di un prodotto ad un area.

Per il primo calcolo consideriamo $u = s/m$ la quantità di prodotti per area, avremo quindi che per ognuno delle u locazioni dovremo calcolare l'entropia in relazione allo stato pieno o vuoto. Assumendo che la probabilità di ogni stato per ogni posizione sia $1/2$, l'entropia per ogni area sarà data da

$$H_{area} = -\sum_{i=1}^u \left(\frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} \right) = \frac{s}{m} \text{ che per } m \text{ aree sarà}$$

$$H_{s1} = mH_{area} = s$$

per quanto riguarda invece la complessità causata dall'allocazione di una variante si consideri che per m varianti sarà:

$$H_{s2} = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i$$

assumendo che l'entropia sarà massima quando la probabilità che un area sia assegnata ad una delle m varianti sarà $\frac{1}{m}$ avremo entropia massima pari a

$$H_{s2max} = - \sum_{i=1}^m \frac{1}{m} \log_2 \frac{1}{m} = \log_2 m$$

e quindi avremo entropia massima per la ILS1 pari a:

$$H_{stock1max} = s + \log_2 m$$

- ILS2: è la strategia di m varianti di prodotto allocate casualmente, questo significa che ogni posizione può assumere m+1 stati, ovvero m stati quando è pieno, e l'ultima quando è vuoto, per cui assumendo $\frac{1}{2}$ la probabilità che ogni posizione sia piena o vuota, nel peggiore dei casi la complessità sarà quindi

$$H_{stock2max} = - \sum_{i=1}^s \left(m \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2m} + \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} \right) = s + \frac{s}{2} \log_2 m$$

- ILS3: è il caso in cui m prodotti vengano posizionati random e le probabilità di ogni stato sono uguali, pertanto per gli m+1 stati di ogni posizione avremo una probabilità $\frac{1}{m+1}$ quindi avremo una complessità pari a:

$$H_{stock3} = - \sum_{i=1}^s \left[(m+1) \frac{1}{m+1} \log_2 \frac{1}{m+1} \right] = s \log_2 (m+1)$$

questa componente della complessità è massima quando la probabilità che un lotto incominci in qualsiasi posizione è la stessa.

$$H_s = - \sum_{j=1}^m p_j \log_2 p_j$$

è legata all'incertezza causata dai possibili m stati di ogni posizione in cui

m sono le possibili varianti che possono accadere ad ogni fase

p_j è la probabilità di ogni posizione di essere nello stato j

questa componente della complessità è massima quando la probabilità di occorrenza di ogni variante m è la stessa.

La combinazione delle tre complessità sopra definite porta alla complessità totale del sistema di produzione personalizzata di massa, diversa nei 3 casi di differente strategia di gestione del magazzino.

I risultati dimostrano che il punto di customizzazione deve essere il più avanti possibile nel processo e che il magazzino nel punto di disaccoppiamento deve essere il più possibile ridotto ai fini di diminuire la complessità dell'intero sistema.

Considerazioni sulla complessità di magazzino:

L'applicazione della formula entropica alla logistica dei magazzini è un esempio concreto di utilizzo pratico dell'uso dell'indice di complessità, riducendo l'impianto di assemblaggio alle sole variabili descritte, T.Zhang e J.Efstathiou individuano un'applicazione pratica e semplice della formula proposta da Frizelle, non tenendo però conto di altri fattori che considerano invece cruciali nei precedenti articoli, come i tempi operativi o il rapporto con la complessità esterna. La stessa trattazione delle strategie di allocazione nei magazzini risulta essere mancante dei casi (molto frequenti nella realtà) di allocazione ibrida dei magazzini (ad esempio divisione dei prodotti in classi, del magazzino in aree per ogni classe e allocazione casuale dei prodotti all'interno di ogni singola area). Pochi altri autori si soffermano su questo aspetto del calcolo della complessità pertanto il lavoro risulta comunque particolarmente significativo.

Altro lavoro in cui il modello entropico viene in particolare applicato alla fase dell'assemblaggio è quello di **Xiaowei Zhu, S Jack Hu, Yoram Koren, Samuel P. Marin** pubblicato nel 2006 [139].

Il processo di assemblaggio diventa molto complesso quando il numero di varianti di prodotto è alto, il che può impattare sulla prestazione del sistema (qualità e produttività). L'articolo focalizza la varietà introdotta manualmente in linee di produzione di assemblaggio di modelli misti dove l'operatore deve fare delle scelte.

Viene definita una misura di complessità chiamata "Operator Choice Complexity" (OCC) proposta per quantificare la prestazione umana del fare delle scelte. A partire dall' OCC, vengono sviluppati dei modelli per valutare la complessità ad ogni stazione, e per la intera linea di assemblaggio.

La *complessità di scelta dell'operatore* è la incertezza o casualità media in un processo di scelta, che può essere descritta dalla funzione H nella seguente forma:

$$H(X) = H(p_1, p_2, \dots, p_m) = -C \sum_{m=1}^M p_m \log p_m$$

in cui

X indica la scelta dell'operatore

M il numero totale di componenti alternativi

p_m la probabilità di scelta dell'm-esimo componente

Proprietà teoriche della funzione H sono:

1. H è continua in p_m , piccoli cambiamenti in p_m producono piccoli cambiamenti nella scelta della complessità
2. Se i p_m sono simili H cresce, per un dato M H è massimo e $= \log M$ quando tutti i p_i sono uguali. H è una funzione crescente di M.
3. Se una scelta di processo viene spezzata in due fasi successive, l'H originale è la somma pesata dei valori individuali di H.
4. $H = 0$ se e solo se tutti i p_m eccetto 1 sono $= 0$, quello $\neq 0$ vale 1
5. H non cambia quando una alternativa addizionale con nessuna possibilità di accadere è aggiunta al sistema originale
6. H è una funzione simmetrica di $p_1, p_2, p_3, \dots, p_M$ se le probabilità di scelta M se le probabilità di scelta sono permutate lungo le alternative, la quantità di complessità di scelta non aumenta
7. Supponendo di avere due processi di scelta successivi, X scelta di utensili e Y scelta di attrezzaggi, con M alternative per la prima e N per la seconda. Se $p(x,y)$ è la probabilità di evento congiunto $\{X = x, Y = y\}$ dove $x \in \{1,2, \dots, M\}$ e $y \in \{1,2, \dots, N\}$. La complessità della scelta congiunta è

$$H(X, Y) = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p(x, y) \log p(x, y)$$

Si dimostra che:

$$H(X, Y) \leq H(X) + H(Y)$$

in accordo con le proprietà teoriche della funzione e i risultati empirici derivanti da una serie di studi svolti su operatori che devono fare una scelta in seguito ad un certo stimolo si definisce

$$\text{Choice complexity} = \alpha(a + bH), \alpha > 0$$

in cui

α peso riferito ad una specifica scelta di processo

a e b sono costanti empiriche

Ogni stazione è costituita da una serie di operazioni che l'operatore deve svolgere in maniera sequenziale operando delle scelte, per esempio la scelta dell'attrezzaggio, dell'utensile, quella della procedura di assemblaggio ecc.

La complessità della stazione è data dalla somma pesata delle complessità delle singole scelte dell'operatore.

$$C_j = \sum_{k=1}^K \alpha_j^k (\alpha_j^k + b_j^k H_j^k), \alpha_j^k > 0, k = 1, 2, \dots, K$$

in cui

α_j^k sono i pesi determinati dalla difficoltà di compito dell'attività di assemblaggio k-esima alla stazione j

α_j^k e b_j^k sono costanti empiriche dipendenti dalla prestazione umana simili a quelle determinate nel corso degli esperimenti relativi al tempo di reazione dell'operatore di fronte a una scelta umana nominale simile a quella ricavata dai dati sperimentali.

H_j^k è l'entropia calcolata a partire dal mix di varianti relativo alla k-esima attività alla stazione j.

Questa misura di complessità costituisce una preziosa informazione per ottimizzare il processo di assemblaggio.

Uno dei lavori più recenti sulla complessità di assemblaggio è stato proposto nel 2008 da **S.J.Hu, X.Zhu, H.Wang, Y.Koren** [140] dove la complessità viene definita come una funzione entropica della varietà di prodotto e sviluppati alcuni modelli per descrivere la propagazione della complessità nei sistemi di assemblaggio multi-stage e nelle catene di fornitura multi-grado.

Parecchie industrie stanno utilizzando sistemi di assemblaggio a modelli misti visto che presentano vari vantaggi. Una linea di assemblaggio comune a diversi modelli consente infatti di risparmiare costi di investimento condividendo diversi prodotti nella stessa linea e assorbendo la fluttuazione della domanda. Diverse ricerche dimostrano che l'incremento di varietà di prodotto

ha un significativo impatto negativo sulla prestazione (qualità e produttività) nel caso di produzione di veicoli automobilistici, compresi l'assemblaggio e la fornitura di componenti.

La complessità è l'incertezza media in un processo random i di gestione della varietà di prodotto, che può essere descritto dalla funzione entropica

$$H_i(p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{iM_i}) = -C \sum_{j=1}^{M_i} p_{ij} \log p_{ij}$$

in cui

p_{ij} è la frequenza di probabilità di uno stato j nel processo random $i, j \in \{1, 2, \dots, M_i\}$

C è una costante che dipende dalla base della funzione logaritmica scelta.

La complessità è dovuta a diversi contributi:

- *station level complexity*: è la complessità dell'operatore nell'effettuare le scelte dei componenti e della sequenza di assemblaggio

$$C_p = \sum_{k=1}^K H_p^k \quad k = 1, 2, \dots, K$$

numerando le attività di assemblaggio sequenziale da 1 a K

e in cui

H è la entropia dovuta alla quota di mix di varianti attribuibili all'attività k -esima della stazione p .

- *system level complexity*: comprende la feed complexity relativa al prelievo di un certo componente o degli utensili specifici per quel componente in corrispondenza di una certa stazione e la transfer complexity che tiene conto delle scelte effettuate alla stazione precedente.

La complessità totale della stazione q è semplicemente la somma della feed complexity + la transfer complexity relativa a tutte le stazioni a monte p .

$$C_q = C_{qq} + \sum_{\forall p:p < q} C_{pq}$$

Una appropriata pianificazione della sequenza di assemblaggio può pertanto ridurre la complessità.

8.2.2. Recenti proposte sulla complessità di assemblaggio del Prof. H.A. ElMaraghy & c.

Nel 2008 *H.A.ElMaraghy e S.N.Samy* [129] propongono un'interessante metrica che pone in relazione la varietà e la complessità di assemblaggio.

Gli autori sostengono che la misura della complessità dell'assemblaggio è uno strumento di supporto al cosiddetto Design For Assembly, assolutamente fondamentale in quanto consente ai progettisti di razionalizzare i diversi processi, sequenze, attrezzature e layout. In particolare l'obiettivo è creare un prodotto con il più efficace equilibrio tra la complessità di fabbricazione e quella di assemblaggio.

La complessità di un sistema manifatturiero si distingue in base al suo comportamento statico o dinamico: la prima considera la struttura del sistema e le relazioni tra gli elementi del sistema, insieme alla varietà dei componenti e alla forza delle interazioni. La complessità dinamica ha a che fare con il comportamento operativo del sistema e la sua imprevedibilità in un certo periodo. Possono quindi essere distinte al proposito due componenti: incertezza e tempo: la prima deriva dalla mancanza di informazione o di conoscenza da parte di chi prende le decisioni e il secondo può corrispondere ad una sequenza (dovuta alla irreversibilità di incidenti e decisioni) e accumulo di conoscenza durante il processo decisionale [141].

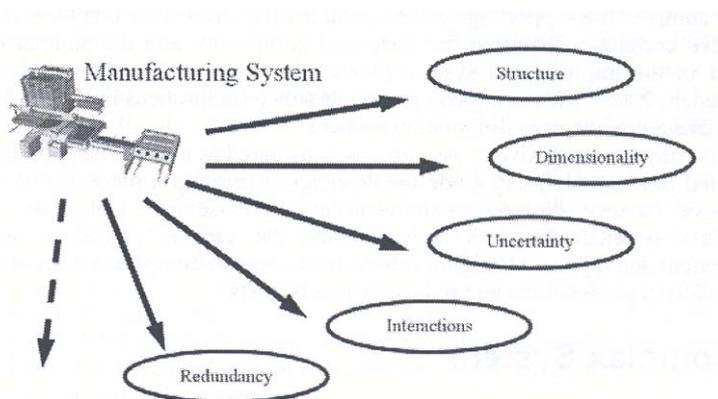


Fig.8.2.7 Sistema manifatturiero complesso [129]

L'attuale complessità dei sistemi manifatturieri è dovuta principalmente alla introduzione delle nuove tecnologie, alla necessaria integrazione tra tutte le fasi di sviluppo del prodotto e alla sempre maggiore richiesta di varietà di prodotti da parte dei clienti. E' proprio su questo ultimo aspetto che viene concentrata l'attenzione.

L'assemblaggio viene infatti considerato come la fase che determina la vita del prodotto, che è qualcosa di più che mettere semplicemente insieme delle parti.

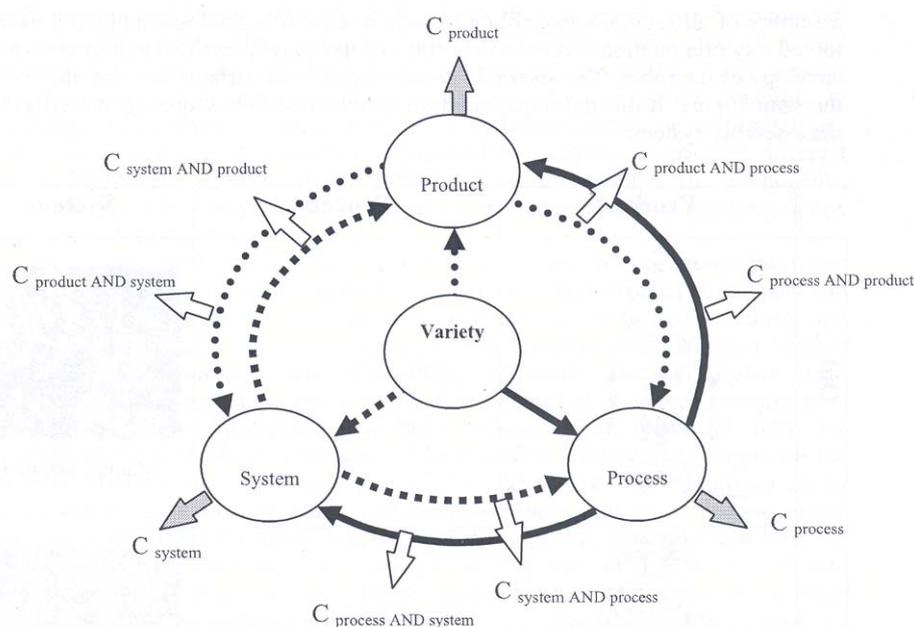


Fig.8.2.8 Varietà dipendente e indipendente e complessità risultante [129]

La complessità di assemblaggio viene distinta in *complessità strutturale* (che tiene conto dell'interfaccia tra componenti, della geometria e delle interazioni) e sequenziale (che considera il numero di operazioni di inserzione). Il processo di assemblaggio diventa pertanto molto complesso quando il numero di varianti di prodotto è elevato, l'aumento di varietà del prodotto è auspicato per mantenere il vantaggio competitivo dell'azienda però allo stesso tempo porta ad un incremento di complessità che porta ad aumenti di costo di fabbricazione magazzino e distribuzione.

Vengono considerati tre livelli di varietà: prodotto, processo e sistema, come mostrato in figura 8.2.8.

Si distinguono inoltre due tipi di varietà:

- varietà indipendente che viene introdotta direttamente in ciascun livello (per esempio la varietà di prodotti)

- varietà dipendente che deriva dall'aver introdotto varietà nel primo tipo di varietà altri livelli (la variazione di sequenza che conduce ad una variazione nel livello di processo e di sistema).

Il livello prodotto include la varietà delle feature dei componenti, il numero di componenti, il numero di moduli, il numero di sotto-assemblaggi; il livello di processo include la varietà di sequenza, relazioni di precedenza; il livello di sistema include varietà del tipo di sistema, inserzioni, fissaggi, collegamenti ecc. La varietà introdotta a ciascun livello influisce sulla complessità di tale livello e probabilmente anche su quella degli altri livelli. E' possibile pertanto definire alcuni componenti di complessità basata sulla varietà che rappresentano le complessità di prodotto, processo e sistema che risultano dall'introdurre varietà direttamente e rispettivamente in tali livelli:

1. $C_{\text{product AND process}}$, $C_{\text{product AND system}}$ che rappresentano le complessità di processo e sistema rispettivamente dovute all'introduzione di varietà nel livello di prodotto
2. $C_{\text{process AND product}}$, $C_{\text{process AND system}}$ che rappresentano le complessità di prodotto e sistema rispettivamente dovute all'introduzione di varietà a livello di processo
3. $C_{\text{system AND product}}$, $C_{\text{system AND process}}$ che rappresentano le complessità di prodotto e processo rispettivamente dovute all'introduzione di varietà a livello di sistema

La complessità totale di assemblaggio C_t è considerata una somma di 9 complessità basate sulla varietà risultanti dalla varietà nei tre livelli secondo la seguente formula:

$$C_t = C_{\text{product}} + C_{\text{processANDproduct}} + C_{\text{systemANDproduct}} + C_{\text{process}} + C_{\text{processANDproduct}} \\ + C_{\text{systemANDproduct}} + C_{\text{system}} + C_{\text{processANDproduct}} + C_{\text{systemANDproduct}}$$

In cui

C_{product} è la complessità di prodotto

C_{process} è la complessità di processo

C_{system} è la complessità di sistema

In generale:

$$C_t = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N C_{product} + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L C_{process} + \sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^V C_{system}$$

in cui

(M,K,U) e (N,L,V) sono i numeri delle varietà dipendenti e indipendenti nei livelli di prodotto, processo e sistema rispettivamente.

Shokri e ElMaraghy propongono nel **2008** [142] una nuova metrica per misurare l'effetto dei componenti, fissaggi e processo di assemblaggio sulla complessità di assemblaggio, che viene definita come funzione di varietà e numero totale di componenti e fissaggi e il relativo sforzo di assemblaggio, riprendendo pertanto il concetto di sforzo introdotto fin dalla prima trattazione sulla complessità di prodotto nel 2003 [110]. In particolare viene considerato l'assemblaggio manuale in termini di un modello basato su una matrice che racchiude l'effetto di elementi fisici e cognitivi di ciascun componente e fattori relativi al processo su di esso.

Viene ribadita l'importanza della misura della complessità di assemblaggio in quanto influenza pesantemente la prestazione e la qualità del prodotto finale e il costo di produzione

Il modello proposto per il calcolo della complessità di assemblaggio riproduce la stessa metodologia usata per il calcolo di complessità di prodotto e di processo [110].

La complessità di assemblaggio è una funzione della diversità e del numero totale di componenti e fissaggi, e del relativo sforzo richiesto per assemblare i componenti. Le proprietà fisiche dei componenti, come la forma, la geometria, la simmetria, le specifiche della superficie, e le proprietà fisiche e materiali influiscono fortemente sul relativo sforzo per eseguire le operazioni di assemblaggio. D'altra parte anche gli elementi del processo di assemblaggio come utensili e fissaggi, relatività delle parti, direzione di assemblaggio, posizione dei giunti, supporto alle parti e tipo di chiusure influenzano tale sforzo.

Come rappresentato in fig. 8.2.9, gli elementi da considerare nella misura della complessità di assemblaggio sono principalmente: selezione, manipolazione, allineamento e inserzione.

L'indice di complessità di assemblaggio viene pertanto definito come:

$$C_{assy} = (D_{assy} + REff) * H_{assy}$$

in cui

H_{assy} definisce la quantità di informazione

D_{assy} è la diversità dell'informazione

REff indica lo sforzo relativo all'assemblaggio

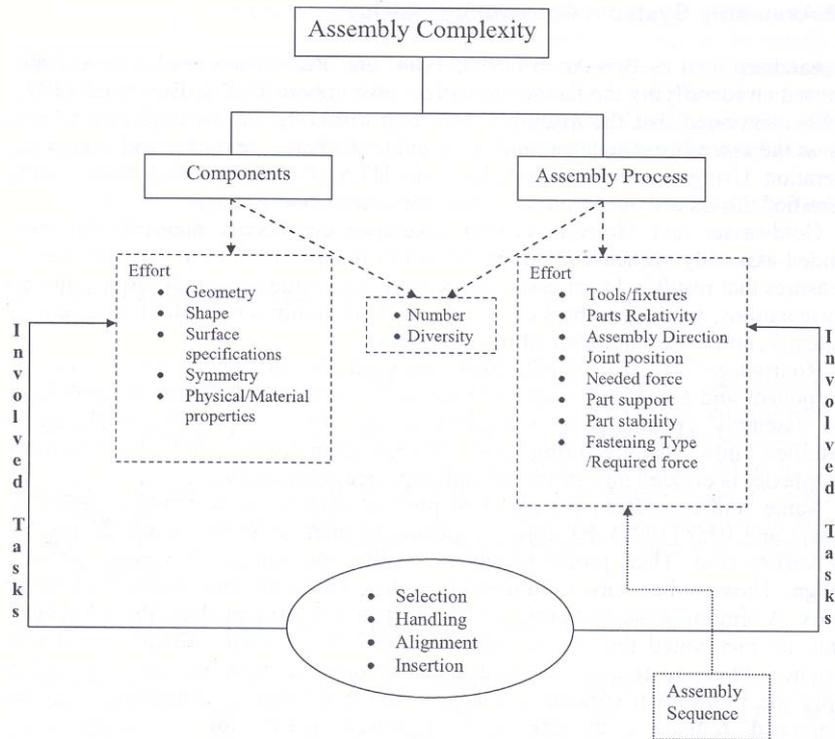


Fig.8.2.9 Elementi della complessità di assemblaggio [142]

$$H_{assy} = \log_2(N + 1)$$

$$D_{assy} = \frac{n}{N}$$

Dove

N è il numero totale di componenti e chiusure

n è il diverso numero di componenti e chiusure

La misura dello sforzo avviene a partire da due elementi:

1. sforzo relativo ai componenti
2. sforzo relativo al processo di assemblaggio

Rispetto al punto 1 il componente è più o meno difficile da assemblare in base alla sua geometria, specifiche superficiali, e proprietà fisiche e materiali. L'elemento che consente di quantificare questo aspetto è la simmetria della parte. Più simmetrico è il prodotto, più facile diventa assemblarlo. Vengono quindi assegnati dei punteggi ai diversi tipi di simmetria α e β in base alla tabella 8.2.1.

α and β -symmetry	0	72	90	120	180	360
Effort Level	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1

Tab.8.2.1 Livello di sforzo basato sulla simmetria [142]

Riguardo al punto 2 al fine di valutare lo sforzo fisico e cognitivo del processo oltre a considerare i diversi elementi che vi partecipano quali utensili e fissaggi per valutare la relatività tra i componenti che vengono assemblati viene creata una matrice di incidenza dove viene rappresentata l'influenza dell'assemblaggio di ciascun componente i su ciascun componente j .

Oltre a questi elementi vengono considerati la selezione, la manipolazione, l'allineamento e l'inserzione del componente. La selezione del componente dipende al numero dei componenti e dal modo in cui sono forniti, per esempio se le parti sono in una confezione separata, saranno più facili da identificare rispetto a se sono impilate tutte insieme.

Lo sforzo relativo a queste fasi dell'assemblaggio viene definito a partire dai già noti Factor_level ai quali viene assegnato il punteggio basso, medio o alto, rispettivamente 0, 0,5 e 1, a partire da considerazioni degli operatori che si occupano di tali assemblaggi.

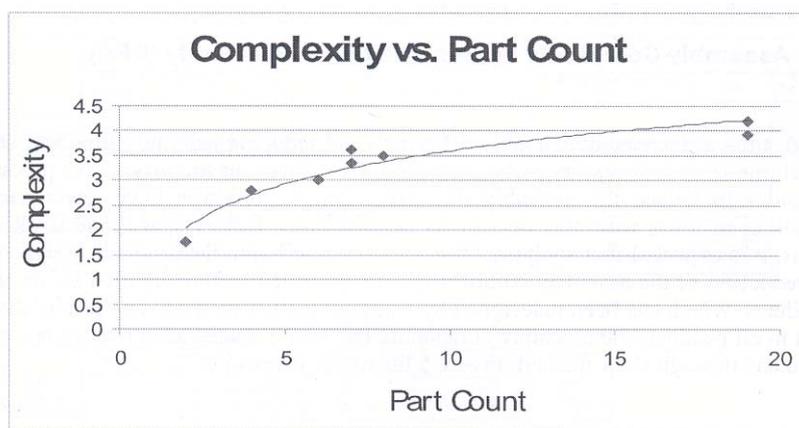


Fig.8.2.10 Complessità di assemblaggio rispetto al numero dei componenti [142]

L'indice di complessità calcolato a partire dai diversi fattori sopra descritti sottolinea la relatività delle parti che costituiscono un prodotto assemblato e costituisce un efficace strumento per il confronto di diverse modalità di assemblaggio nella fase di design del prodotto permettendo la scelta della sequenza migliore per minimizzare tempi e costi, ma anche per individuare quali componenti determinano maggiore complessità e riprogettare il prodotto ai fini di una maggiore semplicità pur mantenendone la funzionalità.

Il presente modello conferma che l'andamento della complessità è crescente con l'aumento del numero di parti.

9. CONSIDERAZIONI PER L'ELABORAZIONE DI UN NUOVO METODO

9.1 Metodologie a confronto

Alcuni autori si sono soffermati sul confronto tra diverse metodologie di calcolo della complessità, in particolare risulta interessante il seguente articolo dove sono state valutate in modo comparato due tra le metodologie più significative: l'intervista e il modello entropico.

Nel 1998 *A. Calinescu, J. Efstathiou, J. Schirn, J. Bermejo* [10] analizzano e valutano confrontandole due metodologie per la misura della complessità precedentemente proposte da altri autori: il modello entropico di Frizelle e Woodcock [100] e le complessità di conoscenza e di tecnologia calcolate tramite interviste secondo le definizioni di Meyer e Foley Curley [88]. La complessità di produzione viene considerata da entrambi gli autori una caratteristica del sistema, che ne consente di monitorare la prestazione e di valutare sistemi alternativi di produzione.

Vengono identificati i seguenti componenti come determinanti la complessità manifatturiera:

- la struttura del prodotto, che è il numero di differenti items, e per ciascun prodotto: numero e tipo di sub-assemblati, tempi di consegna e di ciclo, dimensioni dei lotti, tipo e sequenza di risorse richieste per produrlo
- la struttura dello stabilimento o impianto, che è il numero e tipi di risorse (multi-specializzazione o no, globale vs. dedicato), layout, tempi di setaggio, compiti di mantenimento, tempi di inattività, misure di prestazione
- le funzioni di pianificazione e programmazione, con tre componenti:
 - strategie di pianificazione e programmazione
 - il numero, contenuto, tempo e priorità dei documenti usati per la pianificazione e programmazione
 - il processo di presa di decisioni
- il flusso di informazione: interno (durante il processo di presa di decisioni, nel gruppo di lavoro), intra-plant (con altri dipartimenti) e esterno (con altri impianti, fornitori e clienti)
- il dinamismo, variabilità e incertezza dell'ambiente (cambiamenti richiesti dal cliente, rotture, assenteismo, in accuratezza dei dati e inaffidabilità, scarti/ri-lavorazioni ecc.)

- altre funzioni all'interno dell'organizzazione (addestramento, informazioni politiche ecc.)

Esiste una completa inter-dipendenza tra i componenti della complessità: ogni elemento dipende e influenza gli altri. Vengono di seguito ripresi i concetti base delle due metodologie.

1. *The entropic measurement of complexity*

Questo metodo proposto da Frizelle e Woodcock [100], si basa sulla interpretazione secondo un modello entropico della fabbrica.

La *complessità* del sistema S è definita come:

$$H(S) = - \sum_{j=1}^{N_j} p_{ij} \log_2 p_{ij}$$

in cui

M numero delle risorse

N_j numero dei possibili stati della risorsa j

P_{ij} probabilità della risorsa j di essere nello stato i

Vengono distinte una *complessità statica* che ha origine nella struttura del prodotto e una *complessità dinamica* definita a partire da osservazioni sul sistema condotte a intervalli di tempo regolari in un periodo definito.

La complessità di gestione di un impianto produttivo consiste nell'analisi del progresso dei componenti attraverso le lavorazioni di produzione, e nella misura degli ostacoli che incontrano, cioè le macchine, arrivando alla determinazione di un lead time totale.

Il modello entropico è basato su tre ipotesi:

1. ogni sub-sistema è considerato un processo immigrazione-emigrazione
2. più complesso è un sistema, meno affidabile sarà la sua prestazione e più tempo richiederanno i componenti per essere terminati
3. i processi più complessi costituiscono dei "colli di bottiglia".

La complessità (strutturale) statica dipende dalle caratteristiche del sistema in quanto fornisce la misura della difficoltà intrinseca del processo di produrre il numero e il tipo di prodotti richiesti nel richiesto periodo di tempo. Deve essere misurata su un periodo significativo di tempo, di solito un anno.

L'articolo riporta anche l'esempio di un semplice sistema manifatturiero che comprende due macchine attraverso le quali vengono processati due componenti per dare origine a due prodotti ottenendo un valore di complessità pari a 2,62.

La complessità operativa (dinamica) rappresenta il comportamento operativo del sistema, in particolare come si comportano le code dei pezzi in lavorazione (in termini di lunghezza, variabilità e composizione della coda). La conoscenza delle cause delle code consentirà di scoprire gli ostacoli nel processo. Può essere causata da cause interne dipendenti da quanto bene viene controllato il sistema ed esterne (l'effetto di clienti e mercati). Non è comunque possibile eliminare completamente le cause in quanto derivanti da fattori imprevedibili.

La complessità dinamica viene definita come:

$$H_{dinamic}(S) = -P \log_2 P - (1 - P)P \log_2(1 - P) - (1 - P) \left(\sum_{i=1}^{M^q} \sum_{j=1}^{N^q} p_{ij}^q \log_2 p_{ij}^q + \sum_{i=1}^{M^m} \sum_{j=1}^{N^m} p_{ij}^m \log_2 p_{ij}^m + \sum_{i=1}^{M^b} \sum_{j=1}^{N^b} p_{ij}^b \log_2 p_{ij}^b \right)$$

in cui

P probabilità del sistema di essere sotto controllo

p^q probabilità di avere code di varie lunghezze maggiori di 1

p^m probabilità di avere code di lunghezza 1 o 0

p^b probabilità di avere stati non programmabili

N_j numero degli stati della risorsa j con:

$$N_j = N_j^q + N_j^m + N_j^b$$

La lunghezza della coda è considerata 0 quando la macchina è ferma, è 1 quando la macchina funziona e non c'è nessun componente in coda. La misura delle code viene effettuata osservando e registrando i lavori di fronte ad ogni macchina e nelle aree di passaggio tra le macchine e in generale di work-in-progress.

Gli stati della macchina in fase operativa sono classificati in:

- programmabile: funzionamento, set-up, non attività
- non programmabile: rottura, riparazione, assenza dell'operatore, mancanza di materiale, attesa per il set-up, ri-lavorazione del componente)

2. The Meyer and Foley Curley Method

Nell'articolo di Meyer e Curley [88] vengono definite due complessità:

Complessità di conoscenza si riferisce ad una conoscenza di un ambito specifico e alla presa di decisioni relativa a tale ambito che viene supportata da una applicazione informatica.

Complessità di tecnologia si riferisce alla tecnologia informatica usata per sviluppare, integrare, e diffondere l'applicazione di supporto alla presa di decisioni in uno specifico ambito in tutta un'organizzazione.

Vengono individuate 8 variabili per definire ciascuna complessità, calcolato un fattore di peso per ciascuna e sommati i prodotti di ciascun fattore per il proprio peso. La somma così ottenuta normalizzata fornisce il valore della complessità.

$$\text{Complessità di conoscenza} = \frac{(\sum_{i=1}^{n.\text{variabili}} \text{punteggio}_i \times \text{peso}_i)}{\text{norma}}$$

$$\text{Complessità di tecnologia} = \frac{(\sum_{i=1}^{n.\text{variabili}} \text{punteggio}_i \times \text{peso}_i)}{\text{norma}}$$

La misura viene realizzata a partire dall'analisi di casi applicativi inviando a 108 imprese un questionario che consente di individuare il valore delle variabili. Viene dimostrato il legame tra complessità di conoscenza e complessità di tecnologia, in particolare in relazione allo sviluppo di applicazioni software per la gestione della produzione e il supporto alla presa di decisioni.

Confronto dei due metodi:

Punti di forza del metodo entropico:

- utilizza dati del sistema oggettivi, rappresentativi e rilevati in tempo-reale

Punti di forza del metodo Meyer e Foley Curley:

- metodologia semplice da applicare, rapida, risultati diretti e di facile interpretazione

Punti di debolezza del metodo entropico:

- la misura richiede tempo e i costi di questa metodologia non sono sempre accompagnati da risultati rilevanti e facili da interpretare
- il metodo entropico non considera l'importanza della presa di decisioni che può interrompere il flusso di processo

Punti di debolezza del metodo Meyer e Foley Curley:

- metodologia abbastanza soggettiva, applicabile solo ad un ambito specifico.

La scelta del metodo da utilizzare dipende pertanto dalle risorse disponibili e dall'obiettivo che ci si pone. Nessuno dei due metodi analizzati copre tutti gli aspetti della complessità tecnologica.

La conclusione degli autori è che occorre elaborare un metodo nuovo che consenta una adeguata conoscenza della struttura e dinamica del sistema e che definisca la complessità del flusso di informazione e la sua relazione con la complessità di produzione, così come i suoi effetti sulla complessità del sistema e l'affidabilità di programmazione. Altre caratteristiche desiderate sarebbero la facilità di applicazione (bassi costi di misura), l'affidabilità, l'interpretazione diretta e semplice dei risultati.

Un interessante confronto è quello che viene fatto nel 2008 da *O.Kuzgunkaya e H.A.ElMaraghy* [143] in merito alla *complessità dinamica*, che è stata definita da più autori senza però che sia ancora stata individuata una precisa metrica per la sua misura.

Vari tipi di disturbi interni ed esterni portano i sistemi manifatturieri a deviare dal loro stato pianificato e produrre risultati imprevisti. Non solo eventuali rotture e guasti ma anche le stesse richieste del mercato possono variare così rapidamente da richiedere una forte flessibilità e adattabilità del sistema produttivo per soddisfare i bisogni dei clienti, il che si traduce a livello operativo in una rapida configurazione del sistema. I sistemi manifatturieri sono pertanto da considerarsi complessi, le decisioni da prendere sono molte e l'integrazione di molte funzioni software e hardware rende difficile prevedere l'effetto di una decisione sulla prestazione del sistema.

La complessità è stata classificata in statica e dinamica.

La misura della complessità dinamica consente di valutare la prevedibilità del risultato produttivo e può pertanto aiutare coloro che devono prendere decisioni a scegliere se riprogrammare o meno il sistema.

I quattro più significativi approcci proposti in letteratura per modellare un sistema produttivo a questo proposito sono:

- misura in base alla teoria dell'informazione della complessità operativa, Sivadasan [8]
- modellazione di sistemi in base alla teoria del caos e della dinamica non lineare Deshmuk [7]
- la complessità combinatoria dipendente dal tempo nel design assiomatico, Suh [121,123]
- strategie di riprogrammazione ibride e condotte dagli eventi, Vieira [144]

Teoria dell'informazione

La complessità dinamica del sistema viene misurata in base alla quantità di informazione richiesta per descrivere lo stato del sistema, calcolata tramite il monitoraggio del sistema per un dato periodo. E' una misura dinamica che riflette lo stato del sistema, consentendo di distinguere tra quanto il sistema segue la programmazione e quanto devia rispetto ad essa.

Complessità combinatoria dipendente dal tempo nel design assiomatico

La complessità che insorge in un sistema manifatturiero deve essere riconvertita da combinatoria a periodica ai fini di controllare il sistema riprogrammandolo a intervalli definiti senza aspettare che evolva verso stati incontrollabili.

Complessità dinamica e caos

La complessità dinamica viene definita come il grado di imprevedibilità dei futuri stati di un sistema, dato lo stato corrente. Esistono metodi matematici come gli esponenti di Lyapunov (gli esponenti di Lyapunov di un sistema dinamico in un punto qualsiasi danno una misura di quanto sensibilmente le orbite del sistema sono dipendenti dai dati iniziali e sono quindi degli indicatori della presenza di dinamiche caotiche che consentono di osservare e quantificare il comportamento dinamico di un sistema). E' stato dimostrato come esista un relazione non lineare tra la flessibilità di routing e la complessità dinamica di un sistema manifatturiero.

Riprogrammazione dei sistemi manifatturieri

Quando accade un evento imprevisto nel sistema manifatturiero occorre riprogrammarlo per ripristinare la programmazione prevista. L'impatto di una variazione di programmazione può essere misurato in termini dei seguenti indicatori:

- il tempo di inizio della deviazione tra la nuova programmazione e l'originale
- il numero di azioni di riprogrammazione
- una misura della differenza di sequenza tra le due programmazioni.

Le metriche di misura della complessità dinamica sopra proposte sono diverse ma presentano tutte alcuni punti comuni:

- suggeriscono di ridurre la complessità combinatoria dinamica introducendo periodicità nel sistema al fine di mantenerne la prevedibilità. La riprogrammazione del sistema ne aumenta la complessità statica ma d'altra parte riduce la complessità dinamica tra programmi consecutivi.
- le deviazioni dal programma originale creano complessità
- i disturbi interni ed esterni provocano il bisogno ad un certo punto di riprogrammare il sistema da cui deriva la diminuzione della complessità dinamica

A tal fine occorre introdurre dei sistemi di disaccoppiamento che consentano di scollegare le celle produttive per eliminare conflitti come il caso di un robot richiesto da due pezzi contemporaneamente o adottando un sistema di controllo del processo di tipo “pull” dove i pezzi siano movimentati lungo il sistema quando il pezzo lascia il sistema dopo l’ultima operazione sull’ultima macchina.

Tutte queste considerazioni sono molto preziose per i responsabili di produzione, occorre individuare il livello di frequenza di riprogrammazione che rende il sistema prevedibile al minimo sforzo di riprogrammazione.

Nel 2008 **G.Gonzales Gillis, H.A.ElMaraghy, W.H.ElMaraghy** [39] presentano una significativa *correlazione tra complessità e costi* che può costituire un efficace strumento per minimizzare i costi di fabbricazione. Il lavoro è già citato nel capitolo 2 sugli indicatori visto che definisce anche una metodologia di misura della flessibilità di un sistema produttivo.

Certamente la flessibilità del sistema è una ulteriore variabile di cui occorre tenere conto, sempre più importante nell’attuale panorama competitivo in cui ogni azienda deve essere in grado di rispondere a rapidi cambiamenti della domanda e del mercato corrispondenti ad un sempre più ampio mix di prodotti.

Gli autori individuano un modello che può essere utilizzato nella progettazione del sistema manifatturiero come strategia di confronto che si articola nelle quattro seguenti equazioni:

$$cost \sim f(Flexibility\ Level) \quad 9.1$$

$$\sum Cost_{ij} \sim \sum Complexity_{ij} \quad 9.2$$

$$min \{(Cost_{ij})_1\} = min \{(k_{ij} * Complexity_{ij})_1\} \quad 9.3$$

$$Cost/Complexity \equiv f(Product\ Size) \quad 9.4$$

L’equazione 9.1 mostra che il costo di un sistema manifatturiero è proporzionale alla sua complessità.

L’equazione 9.2 mostra che il comportamento di un sistema manifatturiero è condizionato dalla complessità insita nel sistema che impatta su performance e costi.

L’equazione 9.3 stabilisce che certi elementi di costo possono essere sostituiti dal loro equivalente componente di complessità minimizzato nella matrice di progettazione del sistema.

L'equazione 9.4 dimostra come la dimensione della produzione sia un fattore determinante per il sistema, infatti rapporto tra costo e complessità è una funzione di tale dimensione.

Le sperimentazioni mostrano i range all'interno dei quali i diversi sistemi con differenti gradi di flessibilità risultano più o meno convenienti, e viene determinata una significativa relazione tra costo e complessità rappresentata nella fig. 9.1.1 dove A-A' rappresenta l'andamento ideale della complessità in funzione del tempo, B-B' corrisponde alla curva teorica normale della complessità in funzione del tempo, C.C' indica il lavoro di management e manutenzione al fine di fare i giusti investimenti e mantenere la complessità il più possibile vicino all'andamento ideale A-A', e infine D-D' mostra l'andamento dei costi reali. Esiste pertanto un punto E corrispondente al punto di incontro di tutte queste condizioni.

La comprensione della complessità e flessibilità del sistema consente pertanto di minimizzare i costi e rendere efficaci gli investimenti.

9.2 Scelte per il nuovo metodo

L'analisi dello stato dell'arte sulla complessità tecnologica fino a qui delineato mostra come al momento siano due le teorie più significative:

- Teoria dell'informazione/entropia: basata sulla teoria dell'informazione di Shannon (vedi allegato H) misura la complessità in entrambi gli ambiti fisico e funzionale e la definisce come la quantità di informazione prodotta in un processo
- Teoria del Design Assiomatico: la complessità viene considerata da un punto di vista funzionale e definita come una misura dell'incertezza nell'ottenimento dei requisiti funzionali.

Ai fini di un calcolo di complessità di prodotto quale quello che si propone nel presente lavoro il primo approccio più quantitativo risulta più interessante.

Dall'indagine condotta emerge inoltre che la misura della complessità, può essere svolta in base a diverse metodologie e secondo due approcci: attribuire valutazioni soggettive o attribuire valutazioni oggettive.

Per quanto riguarda la metodologia, l'analisi dello stato dell'arte individua nel lavoro di ricerca del Prof. ElMaraghy e del suo gruppo al momento la fonte più autorevole riguardo alla complessità tecnologica. La metodologia proposta da questi autori è di tipo ibrido, euristico-entropico o puramente entropica a seconda dell'oggetto di misura a cui si riferiscono, quindi si colloca nell'ambito del primo tra i due approcci individuati. L'evoluzione della loro ricerca ha

infatti condotto ad individuare diversi tipi di complessità, partendo dal calcolo di quella del livello base rappresentato da un semplice componente (prodotto), a quella di processo, fabbricazione, macchinario di produzione, sistema manifatturiero, per poi investigare quella di design e assemblaggio.

Molti autori si basano per misurare la complessità su punteggi e valutazioni espressi nel corso di interviste agli operatori della produzione, calcolando un indice di complessità che pertanto risulta soggettivo e dipendente dalle opinioni degli intervistati. La stessa ElMaraghy lo fa nell'attribuire punteggi variabili in modo discreto da 0 a 1 per valutare lo sforzo di fabbricazione dei componenti nel calcolo di complessità del prodotto.

Altri autori utilizzano invece fattori e parametri del sistema rilevabili in modo oggettivo a partire da database aziendali e con osservazioni dirette.

In realtà una misura della complessità come proprietà oggettiva del sistema che non tiene conto di percezioni e cognizioni soggettive, è soltanto teorica perché le variabili considerate rilevanti per il calcolo della complessità sono definite da esseri umani e sono perciò implicitamente arbitrarie e soggettive, ma questo problema è comune a qualsiasi teoria scientifica.

Nel presente lavoro si sceglie di partire da un livello base (come fatto dal gruppo di ricerca del Prof. ElMaraghy) calcolando la complessità di un semplice componente e rimandando per il momento l'analisi del prodotto assemblato. Al contrario però di quanto fatto dal citato gruppo, si concentra l'attenzione sull'aspetto oggettivo della misura e proponendo pertanto un nuovo metodo in cui vengano eliminate le valutazioni soggettive.

Altra importante considerazione riguarda il tipo di processi che caratterizzano la fabbricazione del componente del quale si vuole calcolare la complessità: vengono esaminati processi secondari che attribuiscono al prodotto la sua forma definitiva (ex. lavorazioni per asportazioni di truciolo), trascurando i processi primari (quali estrusione e fusione) che vengono in genere realizzati altri stabilimenti di fornitori (vedi allegato L).

In base alle metodologie analizzate le caratteristiche richieste ad un nuovo metodo sono:

- consentire una adeguata conoscenza della struttura statica e dinamica del sistema
- definire un indice unico applicabile a più settori
- individuare un numero relativamente limitato di fattori significativi
- essere di facile applicazione
- avere costi ridotti
- essere affidabile
- consentire una interpretazione diretta e semplice dei risultati.

Per rispettare tutte le condizioni sopra elencate si ritiene che il metodo di ElMaraghy-Urbanić opportunamente modificato, in direzione di una valutazione totalmente oggettiva, possa essere la soluzione ottimale.

Anche l'utilizzo di questionari può essere efficace per il calcolo della complessità purché basato su:

- numerose domande a risposte oggettive su dati rilevabili del sistema
- un numero minimo di domande con risposta su scala Likert (vedi allegato G)
- numero elevato di interviste
- verifica attendibilità delle risposte soggettive tramite fattore di Cronbach (vedi allegato G) o altri metodi.

Risulta pertanto interessante procedere al calcolo di un indice di complessità di prodotto secondo due diverse modalità sviluppate in parallelo:

- una basata su un modello ibrido euristico-entropico che consiste in una variante della metodologia proposta dai Prof. ElMaraghy e Urbanić
- una che utilizza lo strumento del questionario.

Sarà opportuno focalizzare possibilmente gli stessi aspetti del prodotto e della sua fabbricazione attraverso entrambi i metodi al fine di confrontarne i risultati.

La verifica sperimentale dei due metodi applicati ad alcuni pezzi meccanici, e il confronto degli indici ottenuti tramite le due metodologie tra di loro e con i relativi tempi di fabbricazione, potrà fornire importanti considerazioni sulla loro validità.

10. ELABORAZIONE DI UNA NUOVA METODOLOGIA DI CALCOLO DELL'INDICE DI COMPLESSITA' DI PRODOTTO

10.1 Fattori oggettivi di valutazione della complessità di fabbricazione

La metodologia che viene presentata in questo capitolo si basa su quella proposta dai Prof. ElMaraghy ed Urbanic ampiamente descritta nel paragrafo 7.6. L'analisi dello stato dell'arte sulla misura della complessità e le considerazioni che ne derivano, portano alla scelta di concentrare l'attenzione sull'aspetto oggettivo della misura, proponendo un nuovo metodo in cui vengano eliminate le valutazioni soggettive.

Lo scopo è pertanto quello di sostituire ai valori soggettivi dei *factor_levels* con cui si valutano gli sforzi di fabbricazione e di controllo delle specifiche nella metodologia dei due autori sopra citati, dei fattori indicativi della complessità di fabbricazione che derivano da parametri puramente oggettivi riguardanti la geometria delle features, le tolleranze, le rugosità e fattori di fabbricazione quali il numero dei controlli, il tempo di lavorazione, ecc.. Altro elemento innovativo della metodologia proposta è che, anziché considerare le specifiche del pezzo ed il numero S_N dei controlli su di esse, vengono considerati il numero di operazioni effettuate per la fabbricazione e per il controllo del pezzo ed altri fattori indicativi della complessità del processo di fabbricazione indicando il numero con O_N che pertanto sostituisce S_N . La formula matematica per il calcolo di $CI_{product}$ rimane pressoché invariata, ciò che cambia sono i fattori inseriti nel coefficiente di complessità della feature $c_{f,feature}$. Allo scopo di rispettare la configurazione matematica originale ai *factor_levels* continua ad essere attribuito un valore variabile da 0 a 1, come nella metodologia originale dove gli operatori assegnavano punteggi pari a 0, 0,5 ed 1 a seconda dello sforzo di realizzazione.

Le formule da considerare per il calcolo sono pertanto:

$$CI_{product} = (D_{R_{product}} + c_{j,product}) H_{product}$$

$$c_{j,product} = \sum_{f=1}^F x_f * c_{f,feature}$$

$$c_{f,feature} = \frac{(F_N * F_{CF} + O_N * O_{CF})}{(F_N + O_N)}$$

$$F_{CF} = \frac{(\sum_{j=1}^J factor_level_j)}{J}$$

in cui J è il numero totale degli aspetti geometrici considerati

$$O_{CF} = \frac{\sum_{k=1}^K factor_level_k}{K}$$

in cui K è il numero totale degli aspetti operazionali considerati

Di seguito vengono riportati i fattori nuovi della presente formulazione factor_level tramite i quali viene valutata la complessità di fabbricazione della feature cioè lo “sforzo” per mantenere la stessa nomenclatura originale, in relazione ai diversi aspetti geometrici che la caratterizzano (F_{CF} con $K=3$) e alle operazioni con le quali la feature è fabbricata (O_{CF} con $K=6$).

Fattori geometrici

1. $\frac{TOLLERANZA\ PIU'\ RISTRETTA}{TOLLERANZA\ DELLA\ FEATURE}$
2. $\frac{RUGOSITA'\ PIU'\ RIDOTTA}{RUGOSITA'\ FEATURE}$
3. $1 - \frac{1}{NUMERO\ LATI\ FEATURE + NUMERO\ DIAMETRI\ FEATURE}$

Fattori operazionali di processo

4. $\frac{NUMERO\ OPERAZIONI\ PER\ FABBRICARE\ LA\ FEATURE}{NUMERO\ MAX\ OPERAZIONI}$
5. $1 - \frac{1}{NUMERO\ UTENSILI\ UTILIZZATI\ PER\ FABBRICARE\ LA\ FEATURE}$

6. $1 - \frac{1}{\text{NUMERO DI ASSI DELLA MACCHINA UTILIZZATA PER FABBRICARE LA FEATURE}}$
7. $\frac{\text{NUMERO CONTROLLI PER LA FEATURE}}{\text{NUMERO MAX CONTROLLI}}$
8. $\frac{\text{TEMPO DI ASPORTAZIONE DI TRUCIOLO PER FABBRICARE LA FEATURE}}{\text{TEMPO TOTALE DI ESECUZIONE DEL CICLO PIU' LUNGO IN AZIENDA}}$
9. $\frac{\text{NUMERO PIAZZAMENTI PEZZO PER FARE LA FEATURE}}{\text{NUMERO MAX PIAZZAMENTI}}$

I fattori operazionali di processo che concorrono alla valutazione della complessità di fabbricazione della feature dipendono dall'ambiente lavorativo e dalle risorse produttive dell'azienda. Un esempio significativo riguarda il numero dei piazzamenti: alcune aziende riescono a fabbricare i pezzi (e quindi a realizzare le relative features) con un certo numero di piazzamenti, mentre altre aziende, non riescono a realizzare le stesse features con lo stesso numero di piazzamenti ed hanno bisogno di utilizzarne di più. Questo succede soprattutto negli stabilimenti localizzati in paesi in via di sviluppo con un più basso livello di know-how dove i macchinari sono meno sofisticati e pertanto il numero di piazzamenti è in genere più alto.

La dipendenza da fattori legati alle risorse produttive porta a considerare questa misura della complessità utilizzabile in particolare nell'ambito della Concurrent Engineering, come verrà spiegato meglio nelle conclusioni.

Di seguito si spiegano le motivazioni che hanno spinto ad ideare questi fattori e come essi siano tutti direttamente proporzionali alla complessità.

Fattori geometrici

1. Il primo fattore tiene conto del fatto che per realizzare una feature nel rispetto di una determinata tolleranza richiesta in fase di progettazione bisogna lavorare con grande attenzione, in quanto il non rispetto della tolleranza determina lo scarto del pezzo o la necessità di rilavorarlo.

Il fattore presenta la tolleranza più ristretta al numeratore e la tolleranza della feature al denominatore, è un rapporto tra grandezze espresse in micrometri o millimetri. Maggiore è la precisione richiesta alla lavorazione, maggiore è la complessità: a parità di tolleranza più ristretta (nell'ambito delle lavorazioni meccaniche alle macchine utensili, si considera pari alla IT5). Inoltre più la tolleranza richiesta è ristretta, più essa si avvicinerà a quella limite presa come riferimento al numeratore, fino ad eguagliarla rendendo il factor_level massimo cioè pari ad 1).

Viceversa, più la tolleranza richiesta per la feature si allontana da quella più ristretta più il *factor_level* tende a zero.

2. Il secondo fattore si riferisce al fatto che, affinché una feature abbia una rugosità ridotta, occorre eseguire il lavoro con particolare sforzo in termini di una operazione di rettifica. Questo determina un aumento della complessità del pezzo al crescere del livello di accuratezza richiesto per una determinata superficie.

Il rapporto tra rugosità minima per le lavorazioni effettuate nell'industria meccanica con macchine utensili e la rugosità richiesta per la feature in oggetto, è un rapporto tra misure in micrometri. Più accurata è la finitura richiesta per la superficie, più il rapporto è maggiore, fino ad arrivare al massimo ad 1, se la rugosità richiesta eguaglia quella minima possibile per quella lavorazione. Viceversa, meno accurata è la rugosità superficiale richiesta, minore è il rapporto, fino a tendere a zero per rugosità di superfici non lavorate.

3. Il terzo fattore tiene conto della forma geometrica della feature: più lati e diametri sono presenti in una feature, più la sua forma è complessa e difficile da realizzare. Questi dati sono semplici da estrapolare dai file di CAD o dai disegni rappresentativi del pezzo.

Dato che la complessità cresce all'aumentare della articolazione geometrica del pezzo, cioè all'aumentare del numero dei lati e dei diametri, e dovendo comunque ottenere un fattore compreso tra 0 e 1, si sottrae ad 1 il rapporto di 1 sulla somma del numero di lati e diametri della feature. In questo modo al crescere del numero dei lati e diametri il rapporto diminuisce e quindi il risultato della sottrazione cresce, fino a tendere al massimo ad 1 per un numero di lati e diametri che tende all'infinito. Invece, nel caso più semplice di un foro, si avrà che esso ha un solo diametro e quindi la complessità sarà uguale a 0.

Si è scelto di accorpate in un unico fattore sia il numero dei lati di una feature, sia il numero dei suoi diametri proprio perché nel caso di fori, definibili tramite uno o più diametri, se si fossero separati i due valori si poteva avere uno 0 al denominatore e quindi una situazione non gestibile dal punto di vista matematico visto che il termine sarebbe andato all'infinito.

Fattori operazionali di processo

4. Il quarto fattore è relativo agli aspetti di fabbricazione della feature.

Esso si basa sul fatto che più numerose sono le operazioni utilizzate per fabbricare la feature, maggiore è la sua complessità. E' un rapporto tra numeri, ossia il numero massimo delle

operazioni utilizzate in azienda per realizzare la feature più complessa o comunque che necessita più operazioni ed il numero di operazioni richieste per la feature in oggetto. Il fattore cresce al crescere del numero di operazioni richieste per fabbricare la feature, fino ad arrivare ad un massimo di 1 per feature che richiedono il numero massimo possibile di operazioni. Viceversa, per feature che richiedono una sola operazione per essere realizzate il fattore tende a zero, a seconda della grandezza del denominatore.

5. Il quinto fattore si basa sulla considerazione che più numerosi sono gli utensili utilizzati per fabbricare la feature, maggiore è la sua complessità. Come nel terzo fattore, affinché sia direttamente proporzionale alla complessità si sottrae ad 1 l'inverso del numero di utensili utilizzati per fabbricare la feature e quindi minore è il rapporto e maggiore è il risultato della sottrazione, fino ad arrivare, al massimo di 1 per un numero di utensili tendente all'infinito. Al contrario, per un solo utensile utilizzato si avrà un fattore uguale a 0.

6. Il sesto fattore si basa sul fatto che più numerosi sono gli assi della macchina utilizzata per fabbricare la feature in oggetto, maggiore è la complessità della feature stessa. Come nei fattori precedenti 3 e 5 si sottrae ad 1 il rapporto tra 1 e il numero di assi della macchina, che varia comunemente da $1/2$ a $1/5$ da macchine a due assi a macchine a cinque assi. Quindi, per macchine a due assi sarà pari a 0,5 e per macchine a cinque assi a 0,8, sottraendo tale valore all'unità il fattore finale ha un valore come sempre compreso tra 0 ed 1 e quindi aumentando il numero di assi aumenta il fattore.

7. Il settimo fattore parte dalla considerazione che più numerosi sono i controlli richiesti per una feature, maggiore è la sua complessità. Il fattore è un rapporto tra numeri, ossia il numero di controlli richiesti per la feature in oggetto ed il numero massimo di controlli richiesti per una feature fabbricata all'interno dell'azienda. Maggiore è il numero dei controlli richiesti, maggiore è il rapporto fino ad arrivare al massimo di 1, se il numero dei controlli richiesti per la feature eguaglia il numero massimo dei controlli realizzati per una feature in azienda. Viceversa, se il numero di controlli è pari a 0, il fattore assume valore minimo 0.

8. L'ottavo fattore si basa sul fatto che maggiore è il tempo di asportazione di truciolo per fabbricare la feature e maggiore è la sua complessità. Il fattore è un rapporto tra tempi: al denominatore compare il tempo massimo di asportazione di truciolo che è pari al tempo massimo

di ciclo realizzato in azienda. Viceversa, per tempi di asportazione molto ridotti, il rapporto tende allo 0.

9. Il nono fattore si riferisce ai piazzamenti utilizzati per realizzare una feature, al cui aumentare cresce la complessità della feature stessa. Il fattore è il rapporto tra il numero di piazzamenti necessari per fabbricare la feature in oggetto ed il numero massimo di piazzamenti richiesti per realizzare una feature all'interno dell'azienda. Il fattore massimo è pari ad 1 se per realizzare la feature è richiesto il numero massimo di piazzamenti. Al contrario, se è richiesto un solo piazzamento il fattore tenderà a zero in relazione al numero di piazzamenti massimi a denominatore.

È importante notare che mentre i fattori 1 e 2 non dipendono da parametri e macchinari aziendali (in quanto il rapporto si riferisce a tolleranze massime e rugosità minime rispetto a tutta l'industria meccanica), così come il fattore 3 (dipendente solo dalla forma geometrica della feature), gli altri fattori dipendono dalle attrezzature di produzione utilizzate nell'azienda. Inoltre i fattori 4, 7, 8 e 9 dipendono dai parametri massimi, rispettivamente numero di operazioni, numero di controlli, tempo di lavorazione e numero di piazzamenti, rilevabili in azienda. Questa è una caratteristica importante della metodologia proposta, che pertanto è basata soltanto su dati oggettivi però non consente il calcolo di un indice di complessità di prodotto in modo indipendente dall'azienda che lo produce. Questa considerazione è importante ai fini delle possibili applicazioni dell'indice.

10.2 Metodo di calcolo

Al fine del calcolo dell'indice di complessità, secondo le formule sopra riportate, sono state costruite dei fogli di calcolo con il programma Excel il cui funzionamento viene brevemente descritto a seguire. Per illustrare il procedimento si riportano delle tabelle di un componente che presenta otto features, anche se il metodo è ovviamente valido per qualsiasi numero di features.

Nel primo foglio di calcolo occorre inserire per ogni feature individuata alcuni dati geometrici e relativi alla fabbricazione che vengono poi introdotti nei factor_level geometrici (tab.10.1). La tolleranza più ristretta è riportata per ogni feature perché varia al variare delle dimensioni della feature.

Nel secondo foglio di calcolo (tab.10.2) nelle righe sono riportate le features, nelle colonne gli aspetti operazionali relativi ai macchinari utilizzati per la fabbricazione, che successivamente verranno introdotti nel calcolo dei factor_levels operazionali.

descrizione	tolleranza più ristretta	tolleranza	rugosità	numero lati e diametri
feature1				
feature2				
feature3				
feature4				
feature5				
feature6				
feature7				
feature8				

Tab. 10.1 Foglio di Excel “informazioni geometria feature”

descrizione	numero utensili per fabbricare la feature	numero operazioni utilizzate per fabbricare la feature	numero assi macchina utilizzata per fabbricare la feature	numero controlli per la feature	tempo di asportazione truciolo per fabbricare la feature	numero piazzamenti per fare la feature
feature1						
feature2						
feature3						
feature4						
feature5						
feature6						
feature7						
feature8						

Tab. 10.2 Foglio di Excel “informazioni processo feature”

Questi dati possono essere rilevati in forma automatica da programmi di macchinari CNC, da programmi CAM, o in forma manuale attraverso procedure di marcatura seguite dagli stessi operatori. Naturalmente è auspicabile che l'azienda utilizzi sistemi di tipo automatico al fine di una maggiore correttezza.

Nel terzo foglio di calcolo (tab.10.3) vengono riportate le informazioni sui valori di riferimento più ristretti o massimi che caratterizzano l'insieme delle lavorazioni aziendali, necessari per il calcolo dei factor_level. Mentre la rugosità più ristretta è inserita nel calcolo del secondo factor_level geometrico, le altre voci riguardano i factor_level operazionali, tranne l'ultima "numero tipi di operazione", la cui funzione verrà spiegata successivamente.

rugosità più ristretta	
numero max controlli sul pezzo	
tempo totale di esecuzione ciclo	
numero max di piazzamenti	
numero max operazioni	
numero tipi di operazione	

Tab. 10.3 Foglio di Excel "informazioni pezzo"

Nel quarto foglio di calcolo (tab.10.4) vengono calcolati i factor_level geometrici e per ogni feature viene calcolato quindi il valore di F_{CF} in base alla formula:

$$F_{CF} = \frac{(\sum_{j=1}^J factor_level_j)}{J}$$

dove J è sempre uguale a 3, perché tanti sono gli aspetti geometrici con cui si valutano le feature.

In particolare

$\sum_{j=1}^J factor_level_j$ per ogni feature è riportato nella colonna SOMMA

mentre per ogni feature F_{CF} cioè il rapporto $\frac{\sum_{j=1}^J factor_level_j}{J}$ è riportato nella colonna SOMMA/j.

Nella colonna "numero feature" sono riportati i numeri che nella formula corrispondono a F_N . Inoltre, viene riportato al termine della prima colonna il "numero totale di feature", la cui funzione verrà spiegata successivamente.

descrizione	J=3					
	numero feature	aspetti geometrici per valutare la feature				
		tolleranza più ristretta/tolleranza feature	rugosità più ristretta/rugosità feature	1 - 1/(numero lati feature + numero diametri feature)	SOMMA	SOMMA/j
feature1						
feature2						
feature3						
feature4						
feature5						
feature6						
feature7						
feature8						
numero totale di feature						

Tab. 10.4 Foglio di Excel “aspetti geometrici valutazione”

Nel quinto foglio di calcolo (tab.10.5) vengono calcolati i *factor_level* operazionali operazionali di processo e per ogni feature viene calcolato quindi il valore di O_{CF} in base alla formula:

$$O_{CF} = \frac{\sum_{k=1}^K factor_level_k}{K}$$

dove K è sempre uguale a 6, perché tanti sono gli aspetti operazionali di processo con cui si valutano le feature.

In particolare

$\sum_{j=1}^K factor_level_k$ è riportato per ogni feature nella colonna SOMMA

mentre per ogni feature $\frac{\sum_{j=1}^K factor_level_k}{K}$ è riportato nella colonna SOMMA/k.

descrizione	K=6									
	numero operazioni		aspetti operazionali per valutare il processo di fabbricazione della feature							
		numero operazioni / numero max operazioni	1 – 1/(numero utensili utilizzati per fabbricare la feature)	1 - 1/assi macchina	numero controlli feature/ numero max controlli	tempo di asportazione truciolo per fabbricare la feature/ tempo totale esecuzione ciclo più lungo	numero piazzamenti pezzo per fare la feature/ numero max piazzamenti	SOMMA	SOMMA/k	
feature1										
feature2										
feature3										
feature4										
feature5										
feature6										
feature7										
feature8										
numero totale di operazioni										

Tab. 10.5 Foglio di Excel “aspetti operazionali valutazione”

A differenza della metodologia di *ElMaraghy-Urbanic*, si introduce pertanto O_{CF} (fattore di sforzo operazionale) al posto di S_{CF} (fattore di sforzo dei controlli delle specifiche). Inoltre, nel metodo qui proposto J e K sono fissi, mentre nella metodologia originale erano variabili.

Nella colonna “numero operazioni” sono riportati i numeri che nella formula corrispondono a F_N . Inoltre, viene riportato al termine della prima colonna il “numero totale di operazioni”, la cui funzione verrà spiegata successivamente.

Viene quindi costruito un sesto foglio di calcolo (Tab. 10.6) in cui viene calcolato $c_{j,prodotto}$ a partire dai valori dei fogli di calcolo in base alle formule precedentemente riportate.

	complessità della feature	complessità pesata della feature
feature1		
feature2		
feature3		
feature4		
feature5		
feature6		
feature7		
feature8		
Complessità relativa del prodotto $c_{j,prodotto}$		

Tab.10.6 Sesta tabella denominata “ $c_{j,prodotto}$ ”.

In questo foglio sono calcolati e riportati, per ogni feature, nella colonna “complessità della feature” i valori di $c_{f,feature}$ che si calcolano, analogamente alla metodologia di ElMaraghy-Urbancic, tramite la seguente formula:

$$c_{f,feature} = \frac{(F_N * F_{CF} + O_N * O_{CF})}{(F_N + O_N)}$$

dove F_N è la quantità numerica della i-esima feature, F_{CF} è il fattore di sforzo per realizzare la geometria della i-esima feature, O_N è il numero delle operazioni che servono per realizzare l’i-esima feature e O_{CF} è il fattore di sforzo operativo relativo all’i-esima feature.

Nella colonna “complessità pesata della feature” sono calcolati e riportati, per ogni feature, i valori di $x_f \times c_{f,feature}$ che verranno poi sommati tra di loro per dare come risultato $c_{j,product}$. Tale coefficiente di complessità è calcolato e riportato nella riga “complessità relativa del prodotto c_j ” ed è dato dalla seguente formula:

$$c_{j,product} = \sum_{f=1}^F x_f \times c_{f,feature}$$

dove $c_{j,prodotto}$ è il coefficiente di complessità di fabbricazione del prodotto, F è il numero di feature totali presenti nel prodotto, x_f è la percentuale della i -esima feature diversa nel prodotto e $c_{f,feature}$ è il coefficiente di complessità di fabbricazione della feature.

x_f si calcola, per ogni feature, dividendo la quantità numerica di feature di tipo i -esimo nel prodotto per la quantità numerica totale somma di tutte le feature presenti nel prodotto.

Nel settimo foglio di calcolo sono presenti gli elementi per il calcolo finale dell'indice di complessità $CI_{prodotto}$.

N = quantità informazioni	
n = varietà informazioni	
$D_{R,prodotto} = n / N$	
$H_{prodotto} (entropia) = \log_2 (N + 1)$	

Tab.10.7 settima tabella con gli elementi per il calcolo di $CI_{prodotto}$

Queste informazioni vengono quindi inserite nell'ottavo e ultimo foglio di calcolo, in cui viene utilizzata la formula finale per calcolare l'indice di complessità $CI_{prodotto}$.

indice di complessità totale del prodotto	$CI_{prodotto} = (D_{R,prodotto} + c_{j,prodotto} \times 10) \times H_{prodotto}$
---	---

N è la quantità totale di informazioni sulle feature e sul pezzo, n è il numero che indica la varietà delle informazioni, $D_{R,prodotto}$ è il rapporto tra queste due grandezze e misura la varietà delle informazioni, $H_{prodotto}$ è l'entropia di informazione vista già nel capitolo 3, ed infine $CI_{prodotto}$ è l'indice di complessità del prodotto.

N è calcolato utilizzando la funzione "conta valori", ossia calcolando il numero di tutte le celle contenenti valori, del primo foglio ("informazioni geometria feature"), del secondo foglio ("informazioni processo feature"), del terzo foglio ("informazioni pezzo") più il numero totale

delle features del pezzo (prelevato dalla tabella “aspetti geometrici valutazione”) più il numero totale di operazioni (prelevato dalla tabella “aspetti operazionali valutazione”). Quindi N indica il numero complessivo di informazioni relative alla geometria di tutte le feature ed alle operazioni per fabbricarle.

Invece n è calcolato come la somma delle tre colonne della tabella “informazioni geometria feature”, (cioè si considera un’unica tipologia di informazione per quanto riguarda le tolleranze, una tipologia relativa alla rugosità ed una relativa al numero di lati e diametri), delle sei colonne dalla tabella “informazioni processo feature”(cioè tutte le colonne riguardanti gli aspetti di valutazione operazionali), del numero di features diverse presenti nel pezzo (calcolabile come la somma delle righe di una qualsiasi delle tabelle in cui sono elencate le feature in termini di nomi o numeri) ed infine del numero di tipi di operazioni diverse per il pezzo (che si trova nella tabella “informazioni pezzo”). Pertanto n indica la varietà di queste informazioni cioè la somma delle singole diverse tipologie di features.

Una volta calcolati n ed N, si può trovare il valore del loro rapporto e dell’entropia del prodotto, utilizzando le seguenti formule.

$$D_R = \frac{n}{N}$$

e

$$H = \log_2 (N + 1)$$

Quindi, infine, si applica la formula per calcolare l’indice di complessità di prodotto:

$$CI_{product} = (D_{R_{product}} + c_{j,product}) H_{product}$$

Si è scelto di utilizzare un *fattore correttivo 10* che moltiplica il $c_{j,prodotto}$ perché, analizzando l’esempio riportato da ElMaraghy, Urbanic si è notato che nella loro metodologia il valore di $c_{j,prodotto}$ viene sottovalutato rispetto a quello di D_R . Inoltre, la loro somma spesso non supera l’unità per cui, moltiplicando per l’entropia di informazione, si ottengono valori di CI poco dissimili anche qualora N e H siano invece molto diversi da prodotto a prodotto. Utilizzando questo fattore correttivo, si ottengono valori di CI meno “livellati” essendo proporzionali ad H, e quindi corrispondenti ad una scala di più facile lettura. Inoltre in questo modo su CI incide maggiormente il valore di $c_{j,prodotto}$, cioè degli sforzi di fabbricazione, che nella metodologia originale vengono invece fatti pesare poco, probabilmente proprio perché parte soggettiva e quindi più discutibile. Si è scelto in particolare di assegnare il valore numerico 10 perché esso

assicura che la somma tra D_R e $c_{j,prodotto}$ dia come risultato un valore maggiore o uguale a uno e anche in seguito a test sperimentali eseguiti con diversi valori.

8.3 Conclusioni relative alla nuova metodologia su base entropica

Il metodo descritto in queste pagine è una modifica di quello di ElMaraghy-Urbanic, uno tra i più validi e significativi proposti per la misura della complessità.

Lo sforzo di rendere oggettiva la metodologia, e quindi l'indice stesso di complessità, porta ad ideare dei factor_level diversi da quelli soggettivi della metodologia originale, ma che rappresentano sempre gli sforzi di fabbricazione. Nell'eliminare la soggettività dai vari fattori che influenzano e determinano la complessità (fattore correttivo a parte di cui si sono fornite spiegazioni precedentemente), si è introdotta però una forte dipendenza dalle attrezzature e risorse aziendali: l'indice così calcolato è strettamente legato all'impianto produttivo dove si fabbrica il prodotto.

Mentre ElMaraghy e Urbanic forniscono una definizione di complessità tecnologica di prodotto che consenta un confronto con diversi sistemi manifatturieri e il livello di complessità da questi gestibile, e per fare questo devono rendere indipendente il calcolo dalle attrezzature produttive, nel presente lavoro si fornisce una definizione dell'indice totalmente oggettiva che però comprende necessariamente le caratteristiche delle attrezzature di produzione. Per questo motivo l'utilizzo dell'indice dovrà essere pertanto collocato in un ambito di Concurrent Engineering facendo parte dello stesso processo di sviluppo del prodotto.

Riassumendo:

Il *punto di forza* della nuova metodologia è di fornire un indice di complessità numerico che non è condizionato da valutazioni soggettive e che può essere facilmente calcolato tramite fogli di calcolo.

Il *punto di debolezza* consiste nella forte dipendenza dalle tecnologie e risorse aziendali, che comporta un suo utilizzo efficace nell'ambito di una progettazione integrata con la produzione, ma non altrettanto in operazioni di confronto tra prodotti e stabilimenti produttivi ai fini del controllo della compatibilità del prodotto con le tecnologie produttive disponibili.

11. QUESTIONARIO PER IL CALCOLO DELL'INDICE DI COMPLESSITA' DI PRODOTTO

11.1 Criteri per la stesura di un buon questionario

Questionari ben costruiti possono contribuire a una comprensione più profonda delle complessità della strategia manifatturiera. Queste e altre considerazioni di seguito riportate emergono in una pubblicazione riguardante l'elaborazione di questionari per studi di produzione industriale [145].

Il questionario costituisce lo strumento di supporto allo svolgimento di una intervista. Le interviste possono essere svolte in due forme:

- Personali: permettono all'intervistatore di controllare l'intervistato e hanno in genere un più alto tasso di risposta rispetto ai questionari scritti.
- Posta elettronica o normale: economico ma con basso tasso di ritorno. L'intervistato non può essere influenzato dall'intervistatore in questo caso ma viceversa può non comprendere bene le domande.

Le risposte possono essere di due tipi:

- aperte: maggiore flessibilità, maggiore difficoltà di valutazione
- chiuse: più difficili da costruire ma più semplici da valutare e quindi più spesso utilizzate.

Al fine della elaborazione di un questionario efficace occorre focalizzare prima di tutto i seguenti aspetti:

- obiettivo dello studio
- target a cui si rivolge, che ne determina forma e linguaggio
- collocazione geografica e sociale degli intervistati
- tipo di domande
- metodologia di analisi dei risultati
- disponibilità economica: più ingenti sono le risorse a disposizione e più numerosi e pertanto attendibili saranno i risultati.

Le caratteristiche del questionario affinché sia efficace devono essere:

- lunghezza: evitare troppe domande
- chiarezza delle domande: evitare ambiguità nella richiesta

- univocità: tutti i destinatari devono interpretare la domanda allo stesso modo
- formulazione: deve essere il più oggettiva possibile.
- mancanza di ambiguità: sviluppare una domanda per ogni argomento.

Solitamente un questionario può essere articolato in tre sezioni:

- introduzione
- corpo del questionario
- caratteristiche del rispondente/impresa.

Attenzione a proporre per ultima la sezione relativa alle caratteristiche dell'impresa, di solito si tende a metterla per prima, ma non è consigliabile in quanto porta a "sprecare" il momento iniziale di maggiore concentrazione da parte dell'intervistato a fornire informazioni sull'azienda, arrivando ad affrontare il corpo del questionario con minore attenzione. E' nel corpo infatti che sono contenute le domande topiche, le cui risposte sono fondamentali ai fini dell'indagine.

Le considerazioni sopra riportate e un'analisi di questionari per la valutazione della complessità proposti da diversi autori, in particolare quello di I.Barclay e Z.Dann [89] già riportato nel paragrafo 5.5 e di questionari elaborati ai fini di valutare l'organizzazione di un'azienda [146,147,148] in base al modello four-stage di Wheelwright e Hayes [149], hanno portato alla elaborazione di un nuovo questionario originale il cui obiettivo è quello di calcolare un indice di complessità di prodotto che possa essere confrontato con quello calcolato con il nuovo metodo entropico proposto. Pertanto le domande sono state finalizzate a valutare gli stessi aspetti del prodotto e della sua fabbricazione che sono considerati nella formula al fine di effettuare un confronto efficace.

9.2 Testo del questionario

Il presente questionario è finalizzato al calcolo di un indice di complessità di prodotto. Tale indice costituisce un efficace strumento di supporto per il management di un'impresa produttiva nelle scelte relative alla sua fabbricazione.

1. Indicare se il prodotto è un componente singolo o un assemblato:
 - A) Componente singolo _____ []
 - B) Assemblato _____ []

2. Indicare i materiali con cui viene fabbricato il prodotto:

1)	7)
2)	8)
3)	9)
4)	10)
5)	11)
6)	12)

3. Indicare il numero di componenti di cui è costituito il prodotto (rispondere solo in caso di risposta B alla domanda 1):

< 10	11-20	21-50	51-100	101-150	151-200	201-250	>250
------	-------	-------	--------	---------	---------	---------	------

4. Indicare la complessità geometrica del prodotto. In caso di risposta B alla domanda 1, riferirsi al componente di geometria più complessa:

1 pressoché inesistente	2 bassa	3 discreta	4 elevata	5 molto elevata
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

5. Indicare la tolleranza dimensionale del prodotto o quella più ristretta tra i componenti che costituiscono il prodotto (secondo norma UNI ISO 286/1):

<IT001	IT001-IT2	IT5-IT4	IT5-IT7	IT8-IT9	IT10-IT11	IT12-IT13	>IT14
--------	-----------	---------	---------	---------	-----------	-----------	-------

6. Indicare il grado di finitura superficiale più elevato richiesto ai componenti del prodotto misurata come R_a in μm :

< 0,025	0,025 - 0,1	0,1 - 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 3	3 - 6	6 - 12,5	>12,5
---------	-------------	-----------	-----------	---------	-------	----------	-------

7. Indicare su quali basi viene effettuata la produzione:

- Produzione su commessa
- Produzione di prodotto a catalogo

8 Indicare il tempo di fabbricazione del prodotto (in ore)

<1	1-5	5-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
----	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

9 Indicare il numero di lavorazioni che vengono eseguite sul prodotto (ciclo di lavorazione)

Numero complessivo lavorazioni	
--------------------------------	--

10 Indicare la varietà delle lavorazioni che vengono eseguite sul prodotto (ciclo di lavorazione)

Varietà delle lavorazioni (numero dei diversi tipi di lavorazioni utilizzate per ex. fresatura, tornitura, taglio Laser ecc.)	
--	--

11. Indicare il numero di tecnologie (ex. CNC, Laser, T.T. ecc.) utilizzate per fabbricare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

12. Indicare il tempo medio di set-up delle macchine per la lavorazione sul prodotto (in minuti):

<30	30-60	61-150 (3 ore)	151-360 (6 ore)	361-600 (10 ore)	601-960 (16 ore)	961- 1440 (24 ore)	>1440
-----	-------	-------------------	--------------------	---------------------	---------------------	-----------------------	-------

13. Indicare il grado di abilità/competenza richiesto agli operatori per la fabbricazione del prodotto:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	------------	-----------	-----------------

14. Indicare il numero dei controlli e test sul prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

15. Indicare il massimo grado di complessità dei controlli e test:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

16. Indicare il numero di utensili utilizzati per fabbricare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

17. Indicare il massimo grado di complessità degli utensili (molto elevato → utensile speciale costruito su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------------------------	---------	------------	-----------	--------------------

18. Indicare il numero di attrezzature utilizzate per fabbricare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

19. Indicare il massimo grado di complessità delle attrezzature per la fabbricazione (molto elevato → attrezzatura speciale progettata e costruita su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------------------------	---------	------------	-----------	--------------------

20. Indicare il grado di difficoltà dell'operazione di assemblaggio:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------------------------	---------	------------	-----------	--------------------

21. Indicare il numero di attrezzature utilizzate per assemblare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

22 Indicare il massimo grado di complessità delle attrezzature per l'assemblaggio (molto elevato → attrezzatura speciale progettata e costruita su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

23. Indicare il grado di abilità/competenza degli operatori di assemblaggio:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	------------	-----------	-----------------

24. Indicare il livello di affidabilità richiesto al prodotto:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

25. Indicare il livello qualitativo che deve avere il prodotto per soddisfare le esigenze del cliente target:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

26. Indicare i settori ingegneristici e scientifici integrati nel prodotto in oggetto:

<ul style="list-style-type: none"> • elettrico • elettronico • fluidodinamico • termodinamico 	<ul style="list-style-type: none"> • meccanico • informatico • chimico • _____
---	--

27. Indicare il numero di addetti, interni all'impresa, coinvolti nella realizzazione del prodotto:

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
---	-----	------	-------	-------	-------	-------	-----

28. Indicare il numero di attori (fornitori e consulenti), esterni all'impresa, coinvolti nella realizzazione del prodotto:

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
---	-----	------	-------	-------	-------	-------	-----

29. Indicare il numero di viste e sezioni utilizzate per rappresentare il prodotto:

1	2-3	4-6	7-10	11-20	21-30	31-50	>50
---	-----	-----	------	-------	-------	-------	-----

Informazioni di carattere generale

Dati identificativi dell'azienda:

- Nome: _____
- Ragione sociale: _____
- Sede legale: _____
- Indirizzo: _____
- Sito web: _____
- Numero dipendenti: _____
- Data inizio delle attività: _____
- Fatturato: _____

L'azienda è:

- Capogruppo (indicare il nome delle aziende controllate)

- Controllata (indicare nome capogruppo e paese)

Nel caso in cui la società disponga di un sistema di qualità certificato:

Tipo di Certificazione	Ente Certificatore	Anno di Certificazione

Elenco prodotti dell'azienda:

Presenza di eventuali unità produttive all'estero:

Elenco prodotti fabbricati presso le sedi decentrate:

Indicare il volume di produzione/numero di dipendenti

9.3 Metodologia di elaborazione dei risultati del questionario

L'elaborazione dei dati del questionario viene svolta sulla base di metodologie disponibili in letteratura e considerazioni originali.

Ai fini del calcolo dell'indice di complessità di prodotto, si è scelto di aggregare gli indicatori ricavati dalle 29 domande mediante l'attribuzione di pesi, metodologia più comune nel caso di questionari. Ciascun peso è stato assegnato relativamente ad un totale di 100, a seconda dell'influenza dell'indicatore sulla complessità totale, cioè a ciascuna risposta è stato assegnato un valore di complessità parziale. Questi valori

numerici sono stati in seguito immessi nella formula sotto riportata, che fornisce il valore dell'indice.

$$I_c = \sum_{i=1}^{29} p_i \times c_i$$

dove:

p_i è il peso della i -esima domanda

c_i è la complessità associata alla risposta alla i -esima domanda

100 è la quantità complessiva sulla quale si pesa ciascuna domanda.

Pesi p_i : la somma dei pesi di tutte le domande è uguale a 100. I pesi vanno da 1 a 8. Le domande con peso più elevato influiscono maggiormente sul calcolo dell'indice, pertanto si riferiscono ad aspetti considerati più significativi ai fini del calcolo di complessità. La scelta dei pesi riportati nella seguente tabella è stata fatta in base a criteri soggettivi derivanti dagli studi di testi bibliografici sulla complessità e all'esperienza di officina di tecnici ed operatori.

numero domanda	peso p_i
1	4
2	3
3	8
4	5
5	7
6	4
7	2
8	3
9	2
10	6
11	4
12	1
13	5
14	2

15	1
16	3
17	4
18	2
19	3
20	4
21	3
22	3
23	4
24	3
25	4
26	4
27	2
28	1
29	3
peso totale	100

Tab. 11.1 pesi da attribuire alle domande

Coefficienti di complessità parziali c_i : questi valori vengono attribuiti alla risposta a ciascuna domanda andando da 0 per complessità nulla (ad esempio, complessità delle attrezzature di assemblaggio per un prodotto che è un componente singolo) ad 1 per complessità massima.

Valori di c_i associati a ciascuna domanda del questionario:

1.

A) ASSEMBLATO	1
B) COMPONENTE SINGOLO	0,5

2.

Ogni materiale in più	+ 0,05
-----------------------	--------

3.

< 10	11-20	21-50	51-100	101-150	151-200	201-250	>250
0,125	0,250	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1

4.

1 pressoché inesistente	2 bassa	3 discreta	4 elevata	5 molto elevata
0,2	0,4	0,6	0,8	1

5.

<IT001	IT001-IT2	IT5- IT4	IT5 - IT7	IT8 - IT9	IT10-IT11	IT12-IT13	>IT14
1	0,875	0,75	0,625	0,5	0,375	0,25	0,125

6.

< 0,025	0,025 - 0,1	0,1 - 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 3	3 - 6	6 - 12,5	>12,5
1	0,875	0,75	0,625	0,5	0,375	0,25	0,125

7.

- produzione su commessa	0,7
- produzione di prodotto a catalogo	1

8.

<1	1-5	5-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
0,125	0,250	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1

9.

1-2	3-5	6-10	11-20	21-30	31-50	51-100	>100
0,125	0,250	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1

10.

Ogni lavorazione in più fino a un massimo di 20 (ex, 2 fresature, 1 tornitura, 3 tagli Laser = 3x0,05 =0,15)	+ 0,05
---	---------------

11.

Fusione (fusione in terra, Shell Molding, pressofusione, fusione in conchiglia, microfusione ed altro)	+ 0,125
Formatura (laminazione, fucinatura, estrusione, trafilatura, stampaggio a caldo, stampaggio a freddo, metallurgia delle polveri, altro)	+ 0,125
Saldatura (saldatura a gas, saldatura ad arco, saldatura per punti, saldatura a vibrazione, brasature, altro)	+ 0,125
Lavorazioni per asportazione di truciolo (tornitura, fresatura, foratura, alesatura, piallatura, brocciatura, rettifica, dentatura, lamatura, altro)	+ 0,125
Lavorazione di lamiere (lavorazioni al laser, taglio ad idrogetto, taglio al plasma, taglio meccanico, piegatura lamiere, punzonatura, tranciatura, altro)	+ 0,125
Trattamenti di finitura (ultrasuoni, levigatura, sabbiatura, altro)	+ 0,125
Trattamenti termici (ricottura, normalizzazione, tempra rinvenimento, bonifica, cementazione, nitrurazione, altro)	+ 0,125
Per ogni altra tipologia diversa da quelle sopraelencate utilizzata nella realizzazione del pezzo	+ 0,125

(ex, 2 fresature, 1 tornitura, 3 tagli Laser = 2x0,125 =0,25)

12.

<30	30-60	61-150 (3 ore)	151-360 (6 ore)	361-600 (10 ore)	601-960 (16 ore)	961-1440 (24 ore)	>1440
0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1

13.

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
0,2	0,4	0,6	0,8	1

14.

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1

15.

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
0,2	0,4	0,6	0,8	1

16.

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1

17.

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
0,2	0,4	0,6	0,8	1

18.

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1

19.

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
0,2	0,4	0,6	0,8	1

20.

1 nullo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
0	0,4	0,6	0,8	1

21.

0	1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
0	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1

22.

nessuna attrezzatura	1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
0	0,2	0,4	0,6	0,8	1

23.

nessun operatore	1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
0	0,2	0,4	0,6	0,8	1

24.

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
0,2	0,4	0,6	0,8	1

25.

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
0,2	0,4	0,6	0,8	1

26.

Elettrico	+ 0,125
Elettronico	+ 0,125
Fluidodinamico	+ 0,125
Termodinamico	+ 0,125
Meccanico	+ 0,125
Informatico	+ 0,125
Chimico	+ 0,125
Altro	+ 0,125

27.

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1

28.

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1

29.

1	2-3	4-6	7-10	11-20	21-30	31-50	>50
0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1

12. Verifica sperimentale delle metodologie proposte

12.1 Descrizione dell'azienda

Le metodologie proposte in questo lavoro per calcolare un indice di complessità di prodotto sono state sperimentate in una piccola impresa che realizza principalmente stampi per componenti di furgoni: la Meccanostampi S.r.l., situata a Casoli, in provincia di Chieti.

La Meccanostampi s.r.l. è stata fondata nel 1978 dal signor Domenico Iezzi: inizialmente si occupava della produzione di stampi tranciati, successivamente si è specializzata nella realizzazione di stampi a pressoiniezione termoplastica di medie dimensioni. L'impresa lavora per conto di aziende della provincia di Chieti, quali la Sevel S.p.a. (che realizza furgoni a marchio Fiat, Peugeot e Citroën), Prima S.p.a., Wagon Automotive, Ergom Automotive (tutte aziende di fornitura della Sevel); inoltre lavora direttamente anche per gli stabilimenti Fiat di Torino e di Melfi. I prodotti fabbricati sono stampi per portiere e cruscotti tramite i quali le aziende clienti realizzano componenti in plastica da inserire nei furgoni modello Ducato Fiat, Peugeot Boxer e Citroën Jumper. La fabbricazione degli stampi in plastica in serie viene invece effettuato da aziende clienti o da due aziende vicine Filsiva S.r.l. e Gepla S.r.l.. Inoltre, saltuariamente vengono realizzati anche stampi e componenti con funzionalità diverse da quelle del settore automotive per aziende di piccola o media dimensione.

Lo stabilimento si sviluppa su un'area di 1000 metri quadrati: 200 sono destinati agli uffici tecnici e commerciali, mentre i restanti 800 all'officina.

L'officina è dotata delle seguenti macchine:

- una fresatrice 1400 × 1100 EMERALDA
- una fresatrice 800 × 1000 QUICK JET
- una fresatrice 800 × 1000 OMB
- una fresatrice 400 × 500 CELK
- una fresatrice 900 × 1100 CORREA
- due torni
- due mole per rettifica
- due macchine per elettroerosione a filo FANUC
- una macchina per erosione a tuffo INGERSOLL

- trapani e frese manuali
- banchi per l'aggiustaggio

Il personale si compone di due fresatori, due aggiustatori, un tornitore, un operatore jolly, due progettisti CAD/CAM, un supervisore, un contabile.

Gli operatori sono a servizio dell'azienda da vari anni e quando se ne assumono di nuovi, la loro formazione tecnica viene curata direttamente dal capo officina.

Il volume produttivo del 2007 è stato di una trentina di stampi più alcuni stampi precedentemente realizzati e modificati ed i tempi di produzione vanno dai quindici giorni per stampi semplici a tre mesi per stampi particolarmente complessi.

12.2 Descrizione dei pezzi su cui si sono sperimentate le metodologie e dei loro cicli di lavoro

Al fine di condurre una verifica sperimentale delle metodologie proposte per il calcolo dell'indice di complessità (formula ibrida e questionario) sono stati scelti, in collaborazione con l'ingegnere che si occupa nell'azienda della progettazione e della creazione delle sequenze di lavorazione tramite il sistema CAD/CAM, alcuni pezzi relativamente semplici in quanto gli stampi realizzati sono in genere dall'azienda sono molto complessi, composti da cinque o più parti da assemblare, e per ogni componente dello stampo il numero delle features è elevatissimo e la forma complessa.

L'estrapolazione dei dati necessari alla sperimentazione su tali stampi sarebbe stato pertanto un processo troppo oneroso in termini di tempo e non di semplice realizzazione, inoltre per molte feature fabbricate nell'officina non è possibile separare le "subfeature" che le compongono, quindi si è scelto di sperimentare la formula e il questionario su pezzi semplici, con features visibili e separabili, come richiedevano le esigenze del presente lavoro. In aziende più automatizzate sarebbe possibile estrapolare tutti i dati necessari direttamente dai database e quindi calcolare l'indice anche per pezzi più complessi, ma per gli scopi del presente lavoro e considerando comunque la disponibilità della Meccanostampi, si sono scelti quattro componenti fabbricati in questa azienda, che vengono di seguito descritti insieme ai loro cicli di lavorazione e dei quali si riporta il disegno.

1) SUPPORTO CARRELLO

Questo pezzo è un componente di una macchina automatica per la lavorazione dei tessuti realizzato in acciaio C40 laminato, presenta otto features principali ed il suo costo è di 100 euro. Il disegno è riportato in fig. 12.1.

Il pezzo presenta quattro feature numero 1: si tratta di quattro fori (nel disegno numerati con 1, 2, 3 e 4) a doppio diametro 10,5 e 6,5 mm. Per realizzare questa feature si fa prima una centratura con un centrino di 4 mm di diametro, poi una foratura con una punta di diametro di 6,5 mm ed infine una fresatura con una fresa cilindrica di diametro 8 mm (FC8).

La feature 2 è presente due volte (fori 5 e 6 sul disegno) ed è un foro passante di 5mm di diametro con tolleranza H12 e una tolleranza di posizione di 0,02 mm. Per realizzare questa feature si fa prima una centratura con centrino di 4mm, poi una foratura con una punta di diametro di 4,9mm ed infine un'alesatura di diametro 5mm.

La feature 3 è presente una sola volta ed è un foro passante (numero 7 sul disegno) di 15mm di diametro. Per realizzare questa feature si fa una fresatura con un utensile di fresa torica di 12mm di diametro e raggio di raccordo di 3mm.

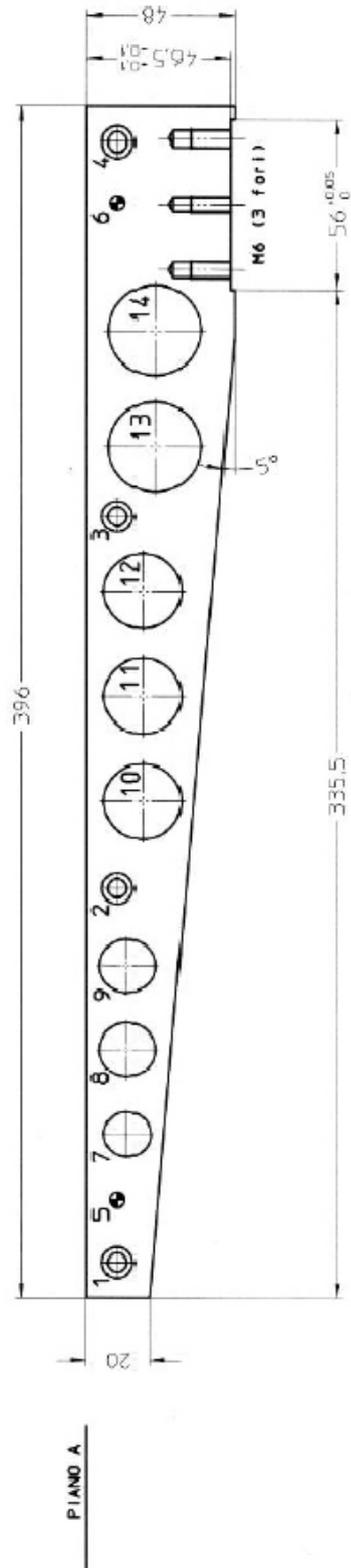
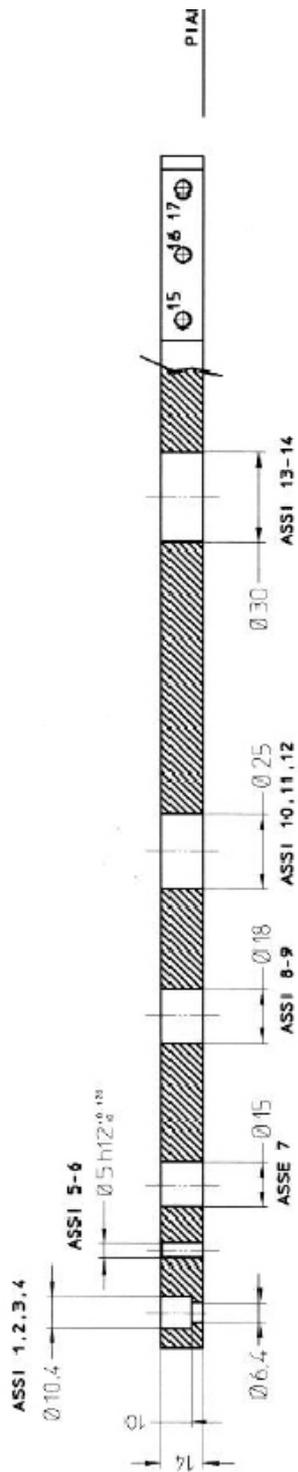
La feature 4 compare due volte (fori 8 e 9 sul disegno) ed è un foro passante di 18mm di diametro. Per realizzare questa feature si usa lo stesso procedimento utilizzato per la feature 3.

La feature 5 è presente tre volte sul pezzo (fori 10, 11 e 12 sul disegno) ed è un foro passante di 25mm di diametro. Per realizzare questa feature vale lo stesso discorso delle due feature precedenti.

La feature 6 è presente due volte sul pezzo (fori 13 e 14 sul disegno) ed è un foro di 30mm di diametro. Per realizzare questa feature viene utilizzato lo stesso procedimento che si usa per le feature 3, 4 e 5.

La feature 7 è presente tre volte sul pezzo (fori 15, 16 e 17 sul disegno) ed è un foro maschiato M6. Per realizzare questa feature si fa prima una foratura utilizzando una punta di diametro 5,2 mm e quindi una maschiatura tramite maschio M6.

Infine, la feature 8 è una cavità lineare larga 56mm situata all'altezza delle cavità dei tre fori maschiati. Per realizzare questa feature si usa una fresa cilindrica di diametro 8mm (FC8).



2) GUIDA LATERALE DESTRA

Questo pezzo è anch'esso un componente di una macchina automatica per la realizzazione dei tessuti (la stessa del supporto carrello): è realizzato in alluminio, presenta sette diversi tipi di features principali ed ha un costo di 130 euro. Il disegno del pezzo è riportato in fig. 12.2.

La feature 1 è una tasca di 130mm di larghezza.

La feature 2 è una tasca di 165mm di larghezza ed è presente due volte sul pezzo.

La feature 3 è una tasca di 150 mm di larghezza.

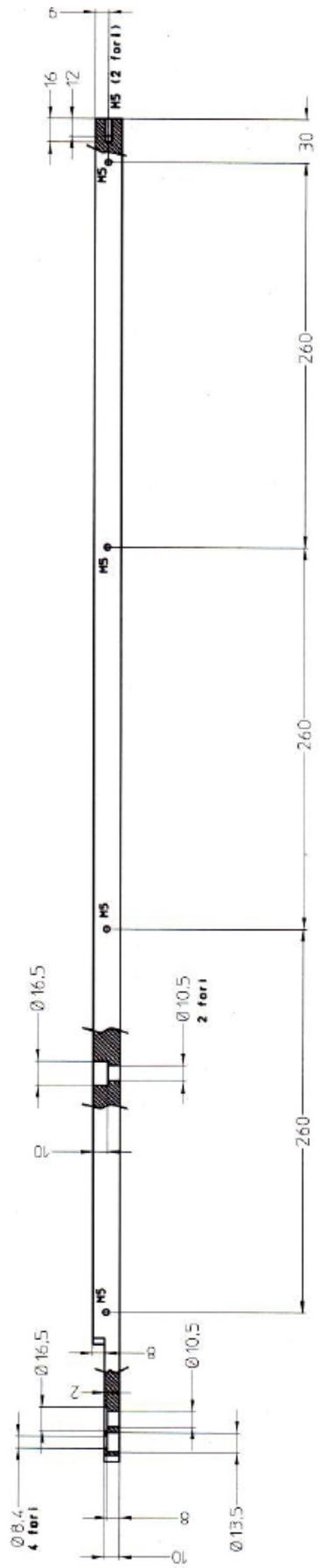
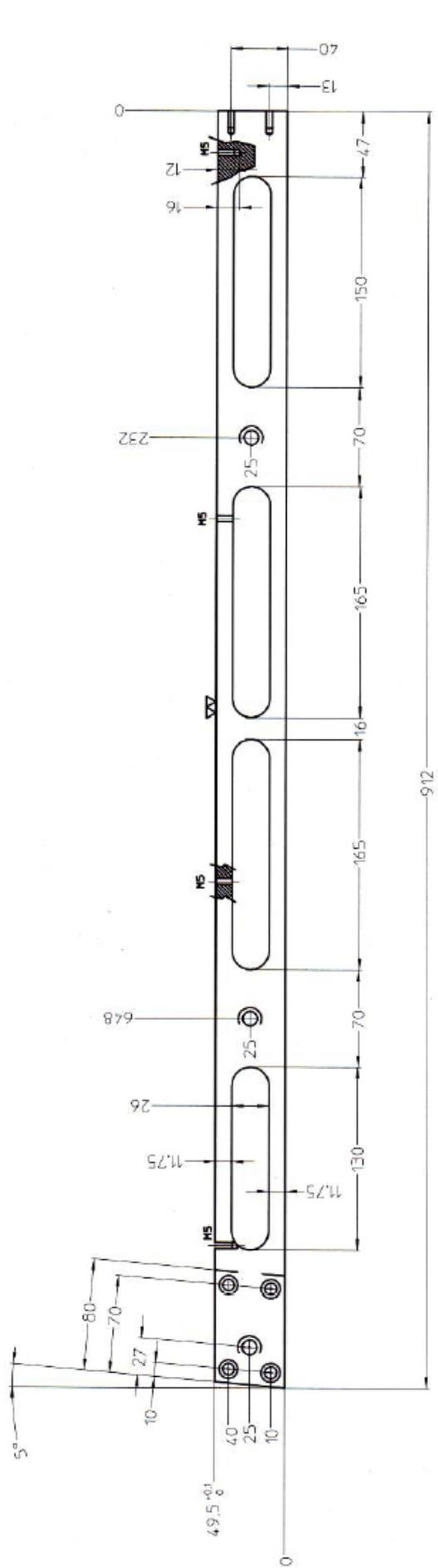
Per realizzare queste tre features è stata fatta una fresatura con fresa torica di 20mm di diametro e 5mm di raggio di curvatura (FT20R5).

La feature 4 è un foro a doppio diametro di 13,5mm e 8,4mm presente quattro volte sul pezzo. Per realizzare questa feature si fa dapprima una centrinatura con un centrino di diametro 3mm, poi una foratura con una punta di 8,4mm di diametro ed infine una lamatura con un lamatore di 13,5mm di diametro.

La feature 5 è un foro maschiato M5 ed è presente sei volte sul pezzo. Per realizzare questa feature si fa dapprima una centrinatura con centrino di diametro 3mm, poi una foratura con una punta di diametro 4,2mm e poi una maschiatura con un maschio M5.

La feature 6 è un foro a doppio diametro, di 10,5mm e 16,5mm presente tre volte sul pezzo. Per realizzare questa feature si fa dapprima una centrinatura con un centrino di diametro 3 mm, poi una foratura con una punta di diametro 10,5 mm ed infine una lamatura con un lamatore di 16,5 mm di diametro.

La feature 7 è una cavità lineare situata a sinistra del pezzo sul disegno. Per realizzarla si usa una fresa torica FT20R5.



3 PORTAMATRICE PER STAMPO DI TRANCIATURA

Questo pezzo è uno dei componenti di un'attrezzatura che serve per fare dei fori in tubi di plastica: è realizzato in acciaio 2738, presenta otto diversi tipi di feature ed ha un costo di 1500 euro. Il disegno del pezzo è riportato in Fig.12.3.

La feature 1 è un foro passante di diametro 10mm ed è presente quattro volte nel pezzo. Per realizzare questa feature dapprima si fa una centrinatura con un centrino di diametro 10mm, poi una foratura con una punta di 9,7mm di diametro ed infine un'alesatura con un utensile di 10mm di diametro.

La feature 2 è un foro cieco maschiato M10 di 9mm di diametro ed è presente otto volte sul pezzo. Per realizzare questa feature si fa dapprima una centrinatura con un centrino di 10mm di diametro, poi una foratura con una punta di 8,6mm di diametro ed infine una maschiatura con maschio M10.

La feature 3 è un forellino maschiato M6 di 5,5mm di diametro ed è presente otto volte nel pezzo. Per realizzare questa feature si fa dapprima una centrinatura con un centrino di 5mm di diametro, poi una foratura con una punta di 5,2mm di diametro ed infine una maschiatura con maschio M6.

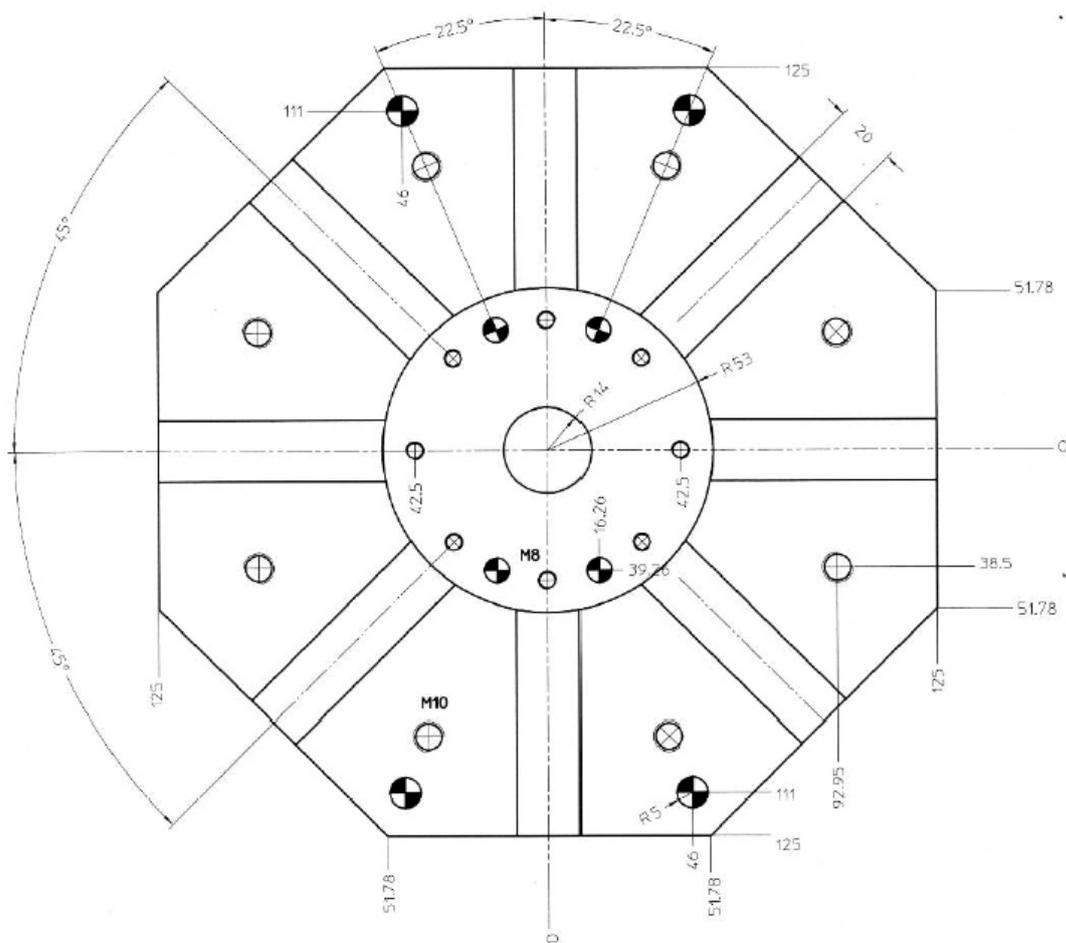
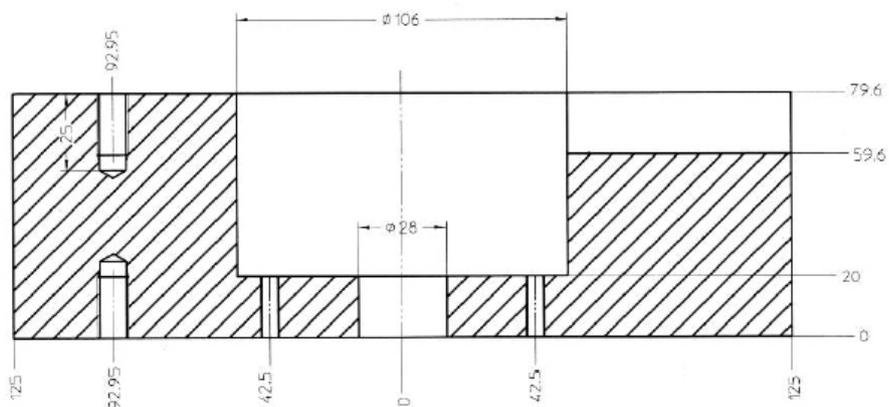
La feature 4 è un foro passante di 8mm di diametro ed è presente quattro volte sul pezzo. Per realizzare questa feature si fa dapprima una centrinatura con un centrino di 8mm di diametro, poi una foratura con una punta di 7,7mm di diametro ed infine un'alesatura con un utensile di 8mm.

La feature 5 è una scanalatura (evidente sul disegno) ed è presente otto volte sul pezzo. Per realizzare questa feature si fa una fresatura con una fresa conica di 12mm di diametro FC12 che esegue più passate sul pezzo.

La feature 6 è un foro grande centrale di 106mm di diametro ed è presente una sola volta nel pezzo. Per realizzare questa feature si fa prima una fresatura di sgrossatura con una fresa torica di 25mm di diametro e raggio di raccordo di 5mm (FT25R5), poi una fresatura di finitura con una fresa torica di 25mm di diametro e raggio di raccordo unitario (FT25R1).

La feature 7 è un foro con un diametro di 28mm adiacente al foro precedentemente descritto, ed è presente una volta sola nel pezzo. Per realizzare questa feature si fa dapprima una centrinatura con un centrino con un diametro di 10mm, poi una foratura con una punta con diametro di 20mm ed infine una foratura con una punta di 28mm di diametro.

La feature 8 corrisponde all'angolo asportato dal pezzo di partenza, un prisma triangolare, che si trova al posto degli spigoli quadrati del pezzo ed è pertanto presente quattro volte. Per realizzare tale feature è stata utilizzata una fresatura con una fresa torica FT25R5.



4 MATRICE PER STAMPO DI TRANCIATURA

Tramite questo pezzo si realizza uno degli stampi di tranciatura che fa parte di una linea che produce barre di rinforzo per il settore automotive. E' realizzato in acciaio K110, presenta tre diversi tipi di feature ed ha un costo di 400 euro. Il disegno del pezzo è riportato in Fig. 12.4.

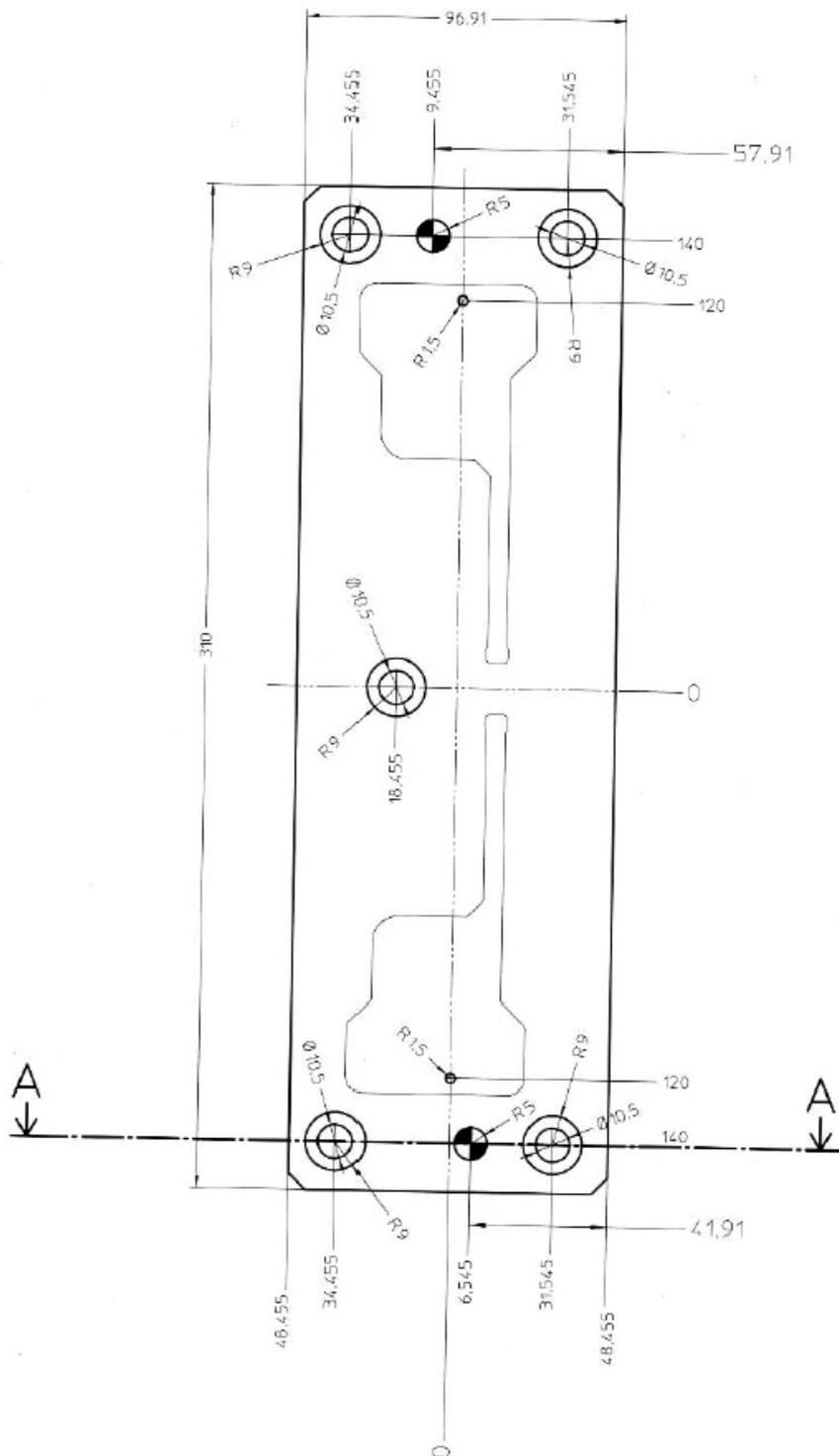
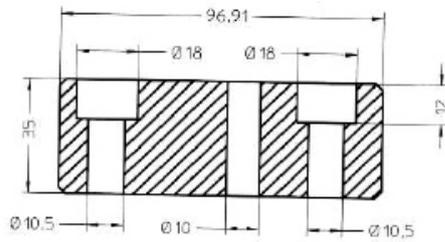
La feature 1 è un foro a doppio diametro di 10,5mm e 18mm ed è presente cinque volte sul pezzo. Per realizzare questa feature si fa dapprima una centrinatura con un centrino di diametro 10mm, poi una foratura con una punta di 10,5mm di diametro ed infine una lamatura con un lamatore di 18mm di diametro.

La feature 2 è un foro passante di 10mm di diametro ed è presente due volte sul pezzo. Per realizzare questa feature si fa dapprima una centrinatura tramite un centrino di 5mm di diametro, poi una foratura con una punta di 5mm di diametro ed infine un'erosione a filo per portare il foro ad un diametro di 10mm.

La feature 3 è la tasca asimmetrica ben visibile sul disegno e presente due volte sul pezzo. Per realizzarla si fa dapprima una centrinatura con diametro di 3mm, poi una foratura con punta di diametro di 3mm ed infine un'elettroerosione a filo per realizzare la forma richiesta dal disegno.

MATRICE

SEZ. A-A



12.3 Modalità con cui sono stati rilevati i dati

Sono state sperimentate sui pezzi sopra descritti le metodologie proposte nei capitoli 8 e 9, riguardanti il calcolo di un indice di complessità di prodotto rispettivamente tramite la formula ibrida contenente i *factor_level* oggettivi e la somministrazione del questionario e relativa elaborazione delle risposte in base ai criteri esposti.

Per quanto riguarda la *formula ibrida*, i dati sono stati prelevati dai file CAD ed dalla descrizione del ciclo di lavorazione pianificato mediante CAM: in particolare i *factor_level* riguardanti gli aspetti geometrici sono stati ricavati dai disegni dei pezzi, mentre i *factor_level* operazionali sono stati ricavati dall'analisi dei cicli di lavorazione.

Per calcolare i *factor_level geometrici* è stato necessario individuare le tolleranze e le rugosità relative alle varie feature (conoscendo già quelle più ristrette per le lavorazioni alle macchine utensili tipiche nell'industria meccanica). Tutte le informazioni sono state trovate analizzando i disegni dei pezzi, per quanto riguarda il numero dei lati e dei diametri delle feature ad esempio nel caso di un foro passante si è contato un solo diametro e nessun lato, per un foro passante a due diametri sono stati considerati due diametri e nessun lato.

Nel caso di alcune feature è stato necessario fare delle semplificazioni: ad esempio per i fori maschiati per i quali si sono considerati due soli diametri, anche se in realtà nella parte terminale ci sono un'infinità di diametri progressivamente più piccoli fino ad arrivare alla punta; le tasche (per le quali si sono considerati il diametro di curvatura e un lato soltanto, visto che i due lati sono paralleli ed hanno la stessa dimensione e gli stessi punti di inizio e fine lavorazione); e le feature che hanno forma complessa per le quali la convenzione utilizzata è che i lati paralleli, con gli stessi punti di inizio e fine lavoro e quindi le stesse lunghezze, siano considerati come un solo lato. Questo perché si assume che l'utensile utilizzato per fare un'asportazione di truciolo o comunque una lavorazione che produca tale feature non debba fare più di una passata (a meno di finiture specifiche che riguardano un solo lato).

Si riporta, a titolo di esempio, un particolare della feature n.3 situata sulla matrice per stampo di tranciatura. La feature è realizzata tramite elettroerosione a filo: il foro, che è ben visibile sulla destra, viene realizzato tramite centrinatura, in questo foro viene poi inserito l'utensile della macchina che esegue l'elettroerosione che tornerà in posizione sulla linea estrema destra ("scavando" la distanza che separa il foro dalla linea della feature) e comincerà a tagliare la

piastra metallica lungo tutta la linea riportata sul disegno (informazione che verrà fornita alla macchina tramite il sistema CAD/CAM). Una volta che l'utensile avrà percorso tutto il perimetro della forma della feature, il materiale della piastra si staccherà e resterà la tasca con la forma richiesta dal disegno.

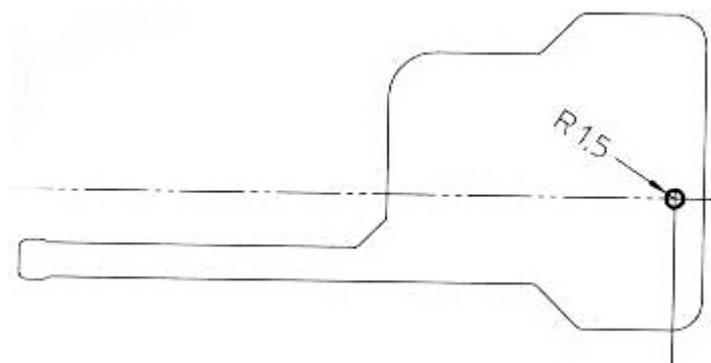


Fig. 12.5 Feature realizzata tramite erosione a file del pezzo 4

Osservando la feature da destra e partendo dalla linea verticale a destra del foro, si considera tale linea come un lato; i due raggi di raccordo (sopra e sotto dalla linea) sono considerati come un unico diametro (perché hanno la stessa dimensione e lo stesso punto di inizio lavorazione se si usa lo stesso sistema di riferimento), i due lati (sopra e sotto i raggi di raccordo) e i due raccordi angolari successivi sono considerati come un unico lato. A questo punto sopra c'è un lato che termina con un raccordo curvo e sotto un lato, più lungo, che termina con un piccolissimo raccordo angolare: anche se hanno lo stesso punto di inizio lavoro e sono paralleli, questi lati sono considerati separatamente nel conteggio perché hanno dimensione diversa. Il resto degli elementi si conteggia in base ai criteri appena descritti contando, in totale 3 diametri e 10 lati.

Si riportano, di seguito, degli esempi di feature presenti sui quattro pezzi testati ed il conteggio dei rispettivi lati e dei diametri.

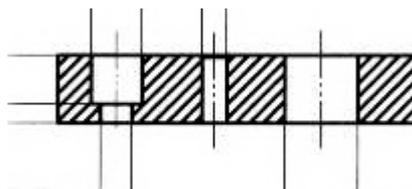


Fig. 12.6 Feature: fori passanti in sezione

A sinistra è riportato un foro a due diametri, mentre a destra due fori passanti ad un diametro. Per il primo foro si considerano 2 diametri e 0 lati, per i secondi 1 diametro e 0 lati. Lo stesso foro a due diametri viene quindi riportato visto dall'alto.

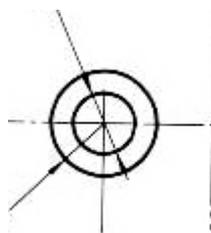


Fig. 12.7 Feature: foro passante a due diametri visto dall'alto

A seguire si riportano i disegni un foro maschiato: come precedentemente specificato per tale foro si considera un diametro caratteristico del suo corpo ed un diametro medio tra gli infiniti diametri progressivamente più piccoli del suo fondo. Quindi per esso sono conteggiati 2 diametri e 0 lati.



Fig. 12.8 Feature: fori maschiati in sezione e in vista dall'alto

Di seguito si riporta una tasca per la quale, per le convenzioni ,descritte in precedenza si considerano 1 diametro ed 1 lato.

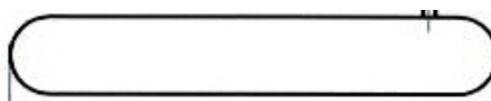


Fig.12.9 Feature: tasca vista dall'alto

Viene quindi considerata una scanalatura rappresentata in termini soltanto di due lati (essendo i quattro lati due a due paralleli) e nessun diametro.

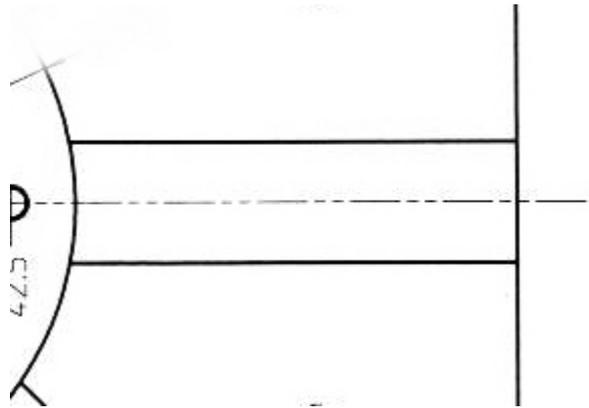


Fig. 12.10 Feature: scanalatura

Per calcolare il numero dei lati e dei diametri si esaminano le sezioni piane delle feature viste dall'alto.

I dati ed i parametri che servono a calcolare i *factor_level operazionali* sono stati acquisiti dalla descrizione dei cicli operativi per la fabbricazione dei vari pezzi dell'archivio dati del sistema CAM. Inoltre per alcune feature, ad esempio per i fori effettuati manualmente utilizzando trapani da banco, i tempi di lavorazione sono stati dedotti senza l'ausilio del CAM ma rilevandoli manualmente direttamente in officina.

Una volta individuati tutti i parametri necessari, sono stati introdotti nei fogli di calcolo Excel, il cui funzionamento è stato precedentemente descritto, che vengono riportati per ogni pezzo in allegato G. Si sono quindi determinati in questo modo gli indici di complessità dei quattro pezzi.

Si è proceduto quindi con la somministrazione del questionario riportato nel paragrafo 11.2 all'ingegnere che si occupa della creazione dei cicli di lavoro e del settaggio delle macchine tramite sistema CAD/CAM. L'ingegnere si è confrontato con gli operatori dell'officina in merito ad alcune risposte e comunque si tratta di una persona che conosce perfettamente macchinari e processi di lavorazione della Meccanostampi.

I quattro questionari e le relative risposte, per ogni pezzo, sono riportate in allegato H. Le risposte sono state quindi elaborate seguendo i criteri riportati nel paragrafo 11.3 calcolando per ogni pezzo l'indice di complessità tramite i fogli di calcolo Excel costruiti allo scopo e riportati nello stesso allegato H.

12.4 Analisi e confronto dei risultati

Si riportano in due tabelle i risultati della verifica sperimentale relativa ai quattro pezzi.

descrizione del pezzo	tempo di fabbricazione (min)	indice di complessità formula ibrida	indice di complessità questionario
SUPPORTO CARRELLO	21,90	13,42	0,248
GUIDA LATERALE DESTRA	30,00	17,81	0,278
PORTAMATRICE PER STAMPO DI TRANCIATURA	114,00	18,32	0,311
MATRICE PER STAMPO DI TRANCIATURA	313,00	18,46	0,315

Tab. 12.1 Valori dei tempi di fabbricazione e dei due indici di complessità dei quattro pezzi calcolati con formula e questionario.

Come si può notare, in entrambi i casi l'ordinamento dei risultati è lo stesso: l'indice più basso, calcolato tramite la formula ibrida, è quello del supporto carrello, maggiore è l'indice della guida laterale destra, ancora maggiore l'indice del porta matrice per stampo di tranciatura ed infine più elevato di tutti l'indice della matrice per stampo di tranciatura.

Si ottengono risultati analoghi con il metodo del questionario, quindi si può affermare che la sperimentazione fornisce un primo riscontro positivo.

Il secondo riscontro positivo è che l'andamento dei valori degli indici è analogo a quello dei tempi di fabbricazione che possono essere considerati un fattore proporzionale alla complessità del pezzo. Si nota infatti che il pezzo con gli indici più bassi, ossia il supporto carrello, presenta un tempo di fabbricazione minore (circa 22 minuti), rispetto alla guida laterale destra che ha i secondi valori più bassi di complessità e corrisponde al secondo tempo più basso (30 minuti). Il pezzo con i terzi valori crescenti dell'indice di complessità, ossia il portamatrice per stampo di tranciatura, presenta il terzo tempo di fabbricazione in ordine crescente ed infine la matrice per stampo di tranciatura, che risulta essere la più complessa corrisponde al tempo di fabbricazione più elevato tra i quattro pezzi. È opportuno notare che i valori dei tempi non sono realmente proporzionali ai valori degli indici: ma questo è facilmente spiegabile in quanto il tempo di fabbricazione è soltanto uno tra i nove `factor_level` che influenzano il calcolo della complessità, ci sono altri fattori che intervengono.

Al fine di verificare l'attendibilità dei risultati si sono inoltre calcolati i valori dei rapporti degli indici dei vari pezzi per effettuare una ulteriore comparazione.

descrizione del rapporto	indice di complessità formula ibrida	indice di complessità questionario
SUPPORTO CARRELLO LENTO/ GUIDA LATERALE DESTRA	0,8	0,9
SUPPORTO CARRELLO LENTO/ MATRICE PER STAMPO DI TRANCIATURA	0,7	0,8
SUPPORTO CARRELLO LENTO/ PORTAMATRICE PER STAMPO DI TRANCIATURA	0,7	0,8
GUIDA LATERALE DESTRA/ MATRICE PER STAMPO DI TRANCIATURA	1,0	0,9
GUIDA LATERALE DESTRA/ PORTAMATRICE PER STAMPO DI TRANCIATURA	1,0	0,9
MATRICE PER STAMPO DI TRANCIATURA/ PORTAMATRICE PER STAMPO DI TRANCIATURA	1,0	1,0

Tab. 12.2 Confronto dei rapporti degli indici di complessità relativi ai quattro pezzi calcolati con le due metodologie

I rapporti tra gli indici dei pezzi ottenuti tramite le due metodologie sono molto simili testimoniando ulteriormente la convergenza dei risultati.

12.5 Conclusioni sulla verifica sperimentale

La sperimentazione delle metodologie proposte in questo lavoro ha dato risultati positivi: gli indici di complessità calcolati con i due metodi convergono e sono crescenti all'aumentare del tempo di fabbricazione, inoltre i rapporti tra gli indici dei vari pezzi, che consentono un confronto tra la complessità dei prodotti esaminati, sono molto simili.

Quindi, nonostante il numero limitato di pezzi testati, si può affermare che gli indici calcolati costituiscano valori affidabili e che le metodologie introdotte possano essere pertanto utilizzate per valutare la complessità di altri pezzi. I due metodi potranno quindi essere raffinati in seguito ai risultati di ulteriori sperimentazioni.

13. CONCLUSIONI

Il presente lavoro analizza il tema della complessità tecnologica ed alcuni argomenti ad essa correlati, quali gli indicatori per valutare i diversi aspetti di un sistema produttivo, in particolare le sue prestazioni, il trasferimento tecnologico e l'introduzione di innovazione.

Riguardo agli indicatori è elaborata una sintesi completa di tutti i principali proposti in letteratura e utilizzati nelle aziende ed è stata svolta una significativa attività di applicazione presso una impresa locale. Anche nel caso del trasferimento di tecnologia sono stati affrontati casi aziendali che hanno fornito importanti spunti per la comprensione della complessità.

L'approfondita analisi dello stato dell'arte sulle metodologie di misura della complessità svolta consente alcune importanti considerazioni sul significato della complessità in un'industria manifatturiera e una classificazione in cinque categorie dei metodi ad oggi proposti. I risultati di questa fase del lavoro sono stati presentati all'International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management di Singapore il 9 dicembre 2008 e pubblicati.

L'individuazione dei punti di forza e di debolezza di ciascuna metodologia ha consentito quindi di giungere all'elaborazione di nuovi metodi originali di calcolo di un indice di complessità di prodotto, che tengono conto degli aspetti geometrici e manifatturieri.

Vengono elaborate due metodologie, una basata su modello entropico ricavata a partire da quella dei Prof. ElMaraghy e Urbanic del 2003, che presenta importanti novità rispetto al metodo originale quali quella di utilizzare solo dati oggettivi, e un questionario che focalizza gli stessi aspetti considerati nella formulazione entropica al fine di un più efficace confronto. I due metodi vengono quindi applicati ad alcuni componenti meccanici grazie alla collaborazione di un'azienda manifatturiera del settore meccanico e i risultati comparati, ottenendo una positiva convergenza.

L'indice di complessità calcolato in base alla metodologia qui proposta è un importante strumento nell'ambito dello sviluppo del prodotto svolto in base ai principi della Concurrent Engineering, cioè di una progettazione integrata con la produzione, nel corso della quale si possa modificare il progetto in relazione ai valori di complessità calcolati, determinando una soluzione ottimale che corrisponda meglio alle esigenze produttive. Può fornire pertanto importanti indicazioni nel corso di studi di fattibilità e più nello specifico di fabbricazione.

14. PROSIEGUO DELLA RICERCA

Il calcolo dell'indice di complessità di prodotto tramite le due metodologie proposte nel presente lavoro, e in generale quelle presenti in letteratura, è subordinato a una dettagliata conoscenza del prodotto, delle sue feature (a questo proposito sarà utile seguire gli sviluppi delle attuali tecniche di riconoscimento feature [150]) e del suo ciclo di lavorazione. Infatti, sia utilizzando la formula che utilizzando il questionario, occorre inserire dati molto precisi che si riferiscono alle modalità di fabbricazione del prodotto e che pertanto implicano che sia già stato fabbricato o comunque una conoscenza molto dettagliata delle tecnologie e dei macchinari di produzione che si utilizzano.

Viceversa il disporre di un indice di complessità del prodotto sarebbe particolarmente utile in una fase iniziale di progettazione indipendentemente dall'impianto produttivo, quando bisogna operare scelte progettuali e manifatturiere per procedere poi nella progettazione di dettaglio in modo più mirato ed efficace, ottimizzando il prodotto in termini di funzionalità, semplicità di assemblaggio e affidabilità (tutti aspetti, come si è visto, fortemente legati alla complessità del prodotto) e la sua fabbricazione, minimizzando tempi e costi.

Al momento non è facile pensare di misurare la complessità del prodotto in modo oggettivo prima che questo venga fabbricato o comunque in modo indipendente rispetto al sistema produttivo che si sceglie per produrlo. Esiste però la possibilità di realizzare delle simulazioni del processo di fabbricazione che consentano di prevedere nei dettagli le sue modalità e quindi di calcolare l'indice a priori, anche prima che venga effettivamente fabbricato. L'indice può essere adottato all'interno di metodologie quali la *Knowledge Based Engineering*, metodo di ingegneria che rappresenta un mix di *Object Oriented Programming (OOP)* con tecniche di *Artificial Intelligence (AI)* [151] (di quest'ultima si cui si è già ampiamente parlato nel capitolo 3) e tecnologie di *Computer-Aided design*, al fine di creare varianti del progetto di prodotto [152] o di processo [153] in modo automatico, applicabile e utile in imprese di tutti i settori e in particolare nelle piccole medie imprese [154]. La KBE, che si inserisce nell'ambito del più ampio *Product Life Cycle Management* [155] che gestisce l'intero ciclo di vita del prodotto, consente di inglobare le best practice e l'esperienza dei progettisti in un modello di progettazione che porta ad un design automatico del prodotto stesso. Come ogni modifica al prodotto può essere portata in seguito ad una simulazione agli elementi finiti del funzionamento del prodotto e ad una valutazione di tempi e costi di fabbricazione grazie a sistemi KBE [151], si potrebbe inserire nel processo iterativo anche delle considerazioni relative all'indice di complessità del prodotto, portando delle

conseguenti modifiche al progetto che permettano di ridurla nel caso superi determinati limiti che ci si pone. Questi valori di riferimento potrebbero essere tanto assoluti quanto relativi all'impianto destinato a fabbricare il prodotto.

In particolare nel caso di aziende che internazionalizzano, o che comunque possiedono diversi stabilimenti produttivi dove il prodotto può essere fabbricato, disporre in fase di sviluppo del prodotto di un indice di complessità consentirebbe di scegliere su base "scientifica", e non solo in funzione di esperienza o considerazioni puramente strategiche ed economiche, quale stabilimento utilizzare per la sua produzione. In questo caso è però fondamentale svincolare il calcolo dell'indice di complessità dalle specifiche attrezzature utilizzate per produrlo, (questo come già riportato, è il motivo per cui probabilmente ElMaraghy e Urbanic ricorrono alla valutazioni soggettive nella loro metodologia, in quanto è l'unico modo per evitare parametri tecnologici vincolati al tipo di macchinario e quindi caratteristici solo di un determinato impianto).

Per valutare quale impianto sia più adeguato alla fabbricazione di un certo prodotto di cui si è già completato il progetto costruttivo, è necessario elaborare una classificazione dei siti produttivi in base alle tecnologie che utilizzano ed calcolare per ciascuno il livello di complessità tecnologica che è in grado di gestire. In questo modo si può procedere quindi ad un "matching" tra la complessità dei prodotti e quella che gli impianti possono affrontare e scegliere su questa base l'impianto giusto. Esistono già lavori scientifici che propongono metodologie per attribuire un indice di complessità all'impianto produttivo (anche dello stesso gruppo di ricerca del Prof. ElMaraghy), sulla base della valutazione dei relativi macchinari ed attrezzature di produzione e con metodologie analoghe a quella utilizzata per il prodotto.

Altro punto che merita un ulteriore sviluppo è la complessità di assemblaggio, in quanto la metodologia qui proposta si riferisce ad un singolo componente partendo volutamente dal caso di prodotto più semplice. Gli stessi Prof. ElMaraghy, Urbanic hanno fatto lo stesso pubblicando nel 2003 la prima trattazione sulla complessità in cui calcolano l'indice di un componente singolo per poi applicare lo stesso procedimento al processo, alla fabbricazione (2004) e all'intero sistema produttivo (2005) ai macchinari di produzione (2006). Recentemente hanno quindi affrontato il tema dell'assemblaggio, pubblicando a settembre 2008 una serie di articoli al proposito. L'assemblaggio è fondamentale in quanto la maggior parte sono assemblati, ma data la complessità della ricerca anche qui si è utilizzato lo stesso approccio, iniziando dal caso più semplice.

La presente ricerca vuole essere pertanto un primo passo verso la messa a punto di un metodo universale oggettivo e di facile utilizzo per la determinazione della complessità tecnologica di un prodotto industriale. Dovrà fare seguito lo sviluppo di un software in grado di interfacciarsi con i diversi sistemi informatici aziendali per raccogliere automaticamente i dati necessari per il calcolo dell'indice e renderlo facilmente disponibile per le valutazioni durante la fase progettuale, un'ulteriore riflessione sull'utilizzo apparentemente limitato dell'indice così calcolato causata, dalla dipendenza esistente tra l'indice e le risorse produttive, e infine l'estensione della metodologia ai prodotti assemblati.

ALLEGATI

ALLEGATO A Esempio di calcolo OEE

In un centro di lavoro il numero di ore di lavoro giornaliero è 8 e ogni giorno il tempo dedicato a manutenzione e attività gestionali varie a impianto fermo è pari a 20 minuti. I guasti e le rotture del macchinario sono quantificabili in 20 minuti giornalieri, i set up in altri 20 minuti e gli aggiustamenti in ulteriori 20 minuti.

Il centro di lavoro processa 400 componenti al giorno con un tempo di ciclo ideale per componente di 0,5 minuti.

Il centro di lavoro produce 98 componenti su 100 conformi.

Calcolare l'OEE.

A Ore di lavoro per giorno = 60 min x 8 ore = 480 min

B *Planned downtime* per giorno = 20 min

C *Loading time* per giorno = A – B = 460 min

D *Equipment downtime* per giorno = 20 + 20 + 20 = 60 min

E *Operation time* per giorno = C – D = 400 min

G Output per giorno = 400 items

H *Tasso di qualità dei prodotti* = 98%

I ciclo ideale prodotto = 0,5 min/item

T *Availability* = E/C x 100 = 400/460 x 100 = 87%

L *Performance efficiency* = [(G x I)/E] x 100 = 50%

OEE = T x L x H = 0,87 x 0,50 x 0,98 x 100 = **42,6 %**

L'OEE è considerato accettabile se assume un valore compreso tra l'85% e il 90%.

Questo implica che i diversi termini che lo compongono siano molto elevati:

Availability > 90%

Performance efficiency > 95%

Quality > 99%



OEE = 85%

Il calcolo dell'OEE consente di individuare le perdite e le loro cause nel macchinario e di portare azioni correttive mirate.

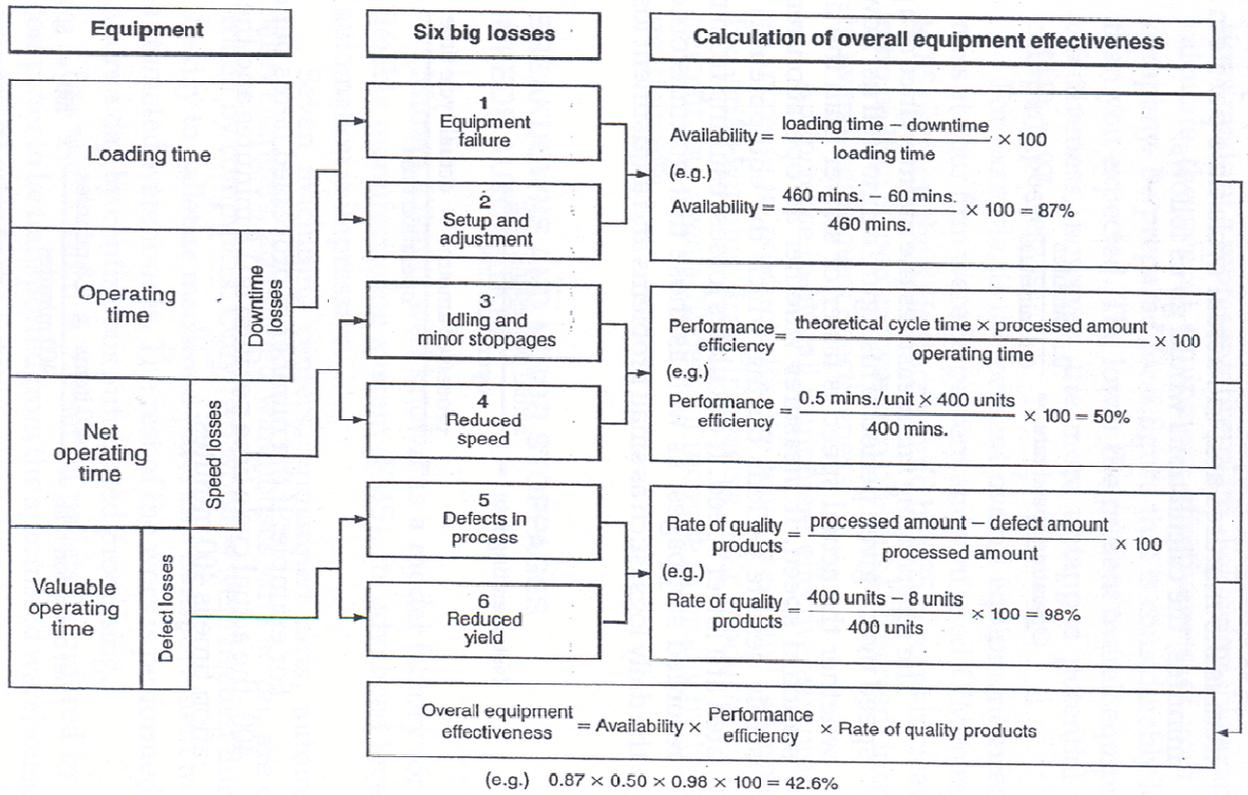


Fig.A.1 Scomposizione dell'OEE calcolato nei diversi contributi corrispondenti ai diversi tipi di perdite

ALLEGATO B Caso aziendale calcolo OEE

B.1 Il gruppo CMS

CMS è un gruppo di aziende specializzate nel settore delle costruzioni meccaniche. Il Gruppo CMS si basa sulla sinergia di aziende operanti nel settore delle costruzioni meccaniche e delle lavorazioni per conto terzi.

Il servizio che il gruppo CMS può offrire parte dalla fase progettuale "Idea Cliente" per concludersi con la realizzazione del "Prodotto Finito, supportando il cliente sin dalle fasi iniziali di progettazione e fornendogli inoltre un Quality Plan con relativa analisi di fattibilità e costo del Progetto/Prodotto.

Il gruppo CMS è costituito da diverse realtà produttive operanti nella stessa area, con competenze complementari:

- *C.M.S. spa*: gestione e sviluppo di programmi di produzione e lavorazioni meccaniche di precisione, assemblaggio e collaudo di gruppi meccanici;
- *F.G.R. srl*: produzione di prototipi, particolari meccanici in piccola-media serie e ricambi meccanici;
- *Poppi srl*: lavorazione della lamiera, taglio laser e carpenteria leggera;
- *S.M.C. srl*: lavorazioni meccaniche e assemblaggio di gruppi meccanico-elettrici.

CMS è in grado di realizzare prototipi e campionature, fornendo ai clienti proposte di industrializzazione prodotto. A tale fine è stata ritenuta strategica l'implementazione di un sistema unico integrato per la gestione informatica dei processi contabili, gestionali e produttivi di tutte le aziende del Gruppo, attraverso il quale accedere ai documenti e standard tecnici aziendali.

B.2 CMS Spa

CMS Spa è l'azienda Capo Gruppo che opera nel settore delle costruzioni meccaniche dal 1975 ed è specializzata nella gestione e sviluppo di programmi di produzione anche di rilevante complessità. Certificata sin dal 1994 secondo la norma UNI EN ISO 9002 è attualmente detentriche della certificazione UNI EN ISO 9001:2000 (sistema qualità) e ISO 14001 (ambiente).

CMS spa si propone come partner di aziende produttive per la progettazione sviluppo, realizzazione, collaudo e fornitura di macchine e componenti meccanici di elevata complessità e precisione.



Fig.B.1 fotografie del reparto assemblaggio di CMS

I settori principali in cui opera sono:

- packaging alimentare e packaging non alimentare;
- macchine per il confezionamento di prodotti liquidi e solidi;
- costruzioni meccaniche per il settore ferroviario;
- costruzioni e componenti meccanici per il settore automobilistico e motoristico;
- macchine per la lavorazione del legno;
- macchine per il settore biomedicale e farmaceutico.



Fig.B.2 Lavorazioni meccaniche in CMS

Le competenze "core" dell'azienda sono: progettazione e sviluppo prodotto, know how tecnico e meccanico, industrializzazione prodotto, supply chain management e montaggio macchine e gruppi.

Le tecnologie su cui si basa la produzione sono la saldatura di tubi e telai in acciaio, le lavorazioni CNC, l'acciaio inossidabile e il titanio, il taglio al laser, i test e i collaudi delle macchine assemblate.

L'azienda opera secondo i principi della Lean Production cioè proponendosi di:

- Ridurre i Lead Time di produzione;
- Aumentare la flessibilità;
- Ottimizzare i processi produttivi.

B.3 Metodologia di lavoro

Seguendo un'esigenza dell'azienda stessa si è svolta un'attività finalizzata all'individuazione di indicatori di performance efficaci per il controllo e il monitoraggio del sistema produttivo. L'obiettivo è disporre di strumenti di controllo e monitoraggio che consentano di ridurre i costi, gli sprechi, i tempi di consegna e aumentare quindi qualità, affidabilità e soddisfazione del cliente.

Il lavoro svolto presso CMS può essere descritto attraverso le seguenti fasi:

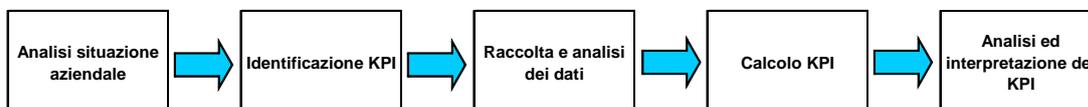


Figura B.2: Fasi dell'attività svolta presso CMS

B.4 Individuazione KPI

Il primo obiettivo che ci si è posti è stato quello di individuare i KPI utilizzati in azienda per la valutazione della prestazione aziendali. I KPI sono legati alle caratteristiche del sistema produttivo CMS e vengono riportati nella figura AAA.1.

Allo scopo di identificarli è stata condotta un'intervista al responsabile Programmazione Produzione, che in particolare ha condotto all'individuazione dei tre indicatori di produzione che sono evidenziati in giallo:

- OEE
- Ore di rilavorazione
- Tasso di difettosità

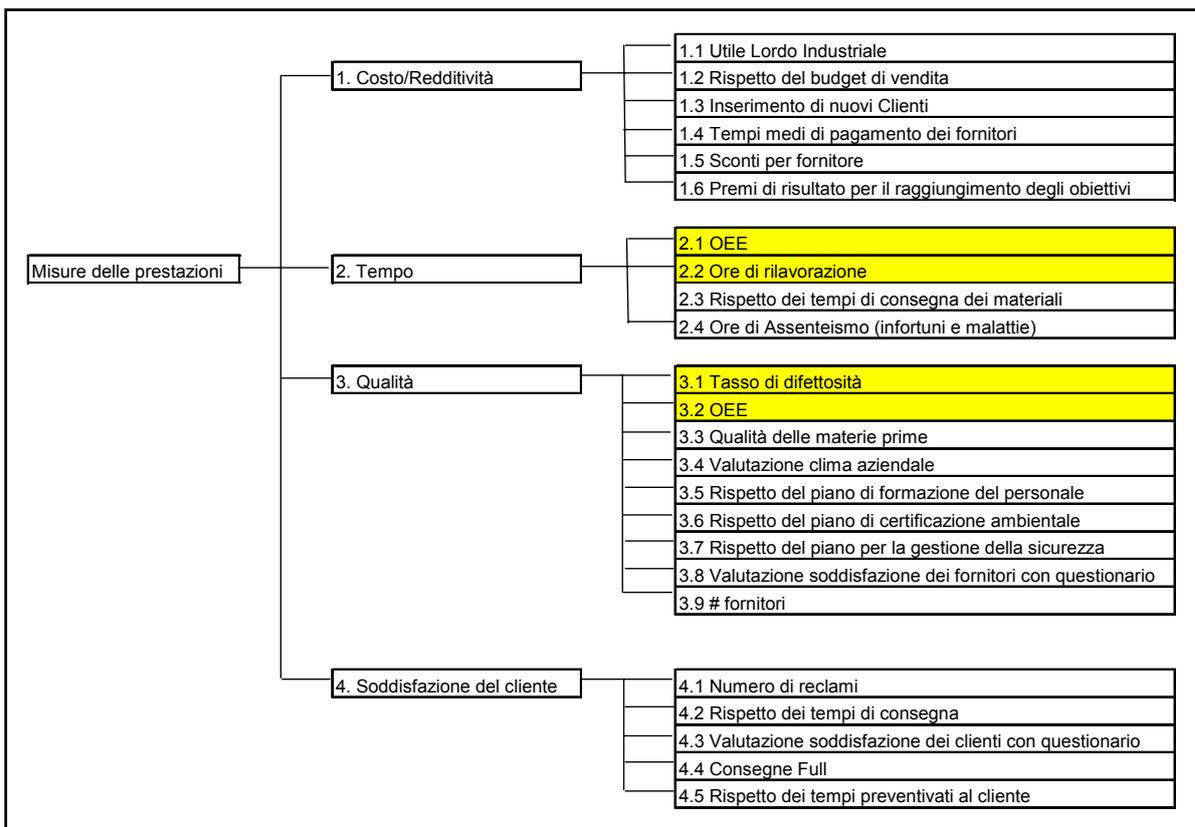


Figura B.3: Indicatori CMS Spa

B.5 Descrizione sistema produttivo CMS

Il sistema produttivo CMS può essere suddiviso in due aree principali: quella di produzione e quella di montaggio.

L'area di produzione è organizzata secondo un Job Shop, cioè per reparti, dove in ognuno sono raggruppate tutte le macchine che realizzano il medesimo processo tecnologico (ad. esempio torni, frese, ecc.). Ogni reparto è coordinato e gestito da un unico responsabile che viene chiamato Team Leader del reparto.

La modalità di realizzazione del volume produttivo è una produzione per lotti o, a volte, unitaria (per esempio nel caso di pezzi speciali da produrre in singoli esemplari).

I pezzi vengono movimentati da un reparto all'altro (con carrelli motorizzati a guida manuale o transpallet) raggruppati in lotti depositati su pallet o in appositi contenitori.

All'interno di tutto il Gruppo CMS sono presenti 172 differenti macchine e attrezzature, parte delle quali si trovano nell'impianto produttivo di CMS Spa e vengono elencate nella tabella D.1.

Tipo Macchina	Numero
Tornitura CNC	13
Fresatura CNC	36
Fresatura tradizionale	19
Tornitura tradizionale	10
Taglio	13
Macchine per elettroerosione	2
Stazioni di finitura	31
Stazioni di Sbavatura	5
Equipaggiamenti di saldatura	25
Robot di saldatura (3 stations)	1
Robot di sbavatura	1
Attrezzature per setting utensili	6
Macchine per taglio lamiera (2 a Laser)	5
Macchine piegatrici	2
Impianti Elettrolucidatura	2
Impianti decapaggio	1
Totale	172

Tab.B.1 Macchine Gruppo CMS

56 operai lavorano nell'area di produzione di CMS Spa e la produzione viene realizzata in 2 stabilimenti diversi che globalmente occupano una superficie di 8.400 mq.

I lay-out degli stabilimenti produttivi tipicamente job-shop (denominati CMS1 e CMS3) sono stati riprodotti graficamente nella figura B.4 e B.5.

Per quanto riguarda le tecniche di pianificazione della produzione l'azienda si basa sui due modelli:

- MRP (Material Requirements Planning): per la maggioranza dei codici prodotti;
- JIT (Just In Time): per la carpenteria pesante attraverso cui realizza i prodotti così detti di classe A, ossia quelli a maggior valore per l'azienda, tramite una gestione Kanban.

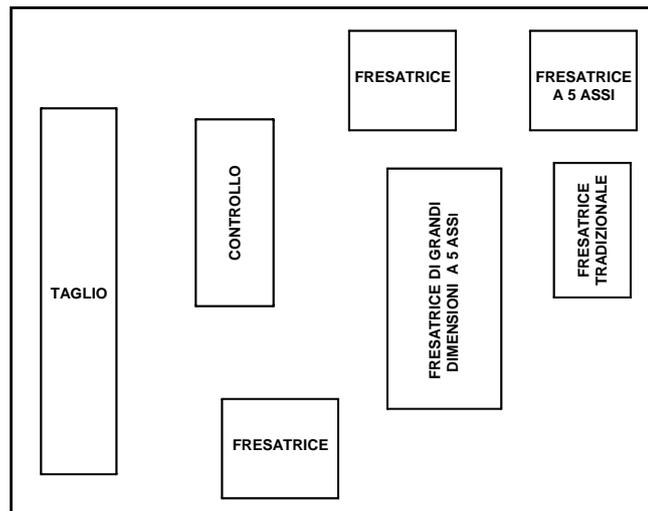


Fig.B.4: Lay-Out CMS1

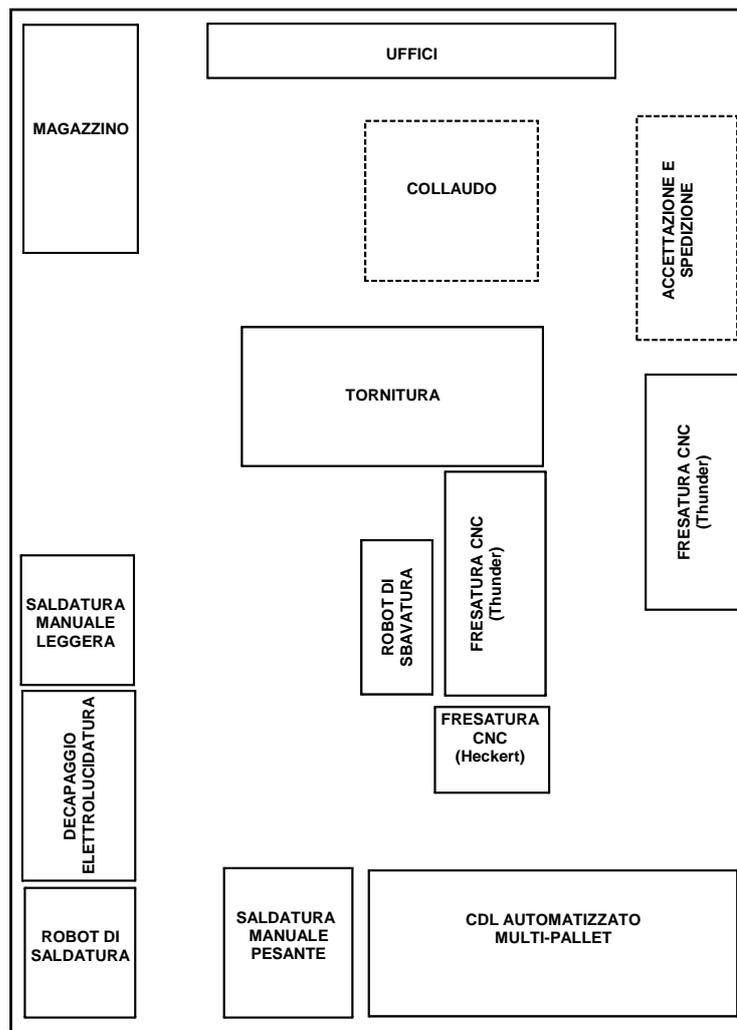


Figura B.5 Lay-Out CMS3

Tra i principali *punti di forza* del sistema produttivo CMS si sottolinea:

- La flessibilità del mix: il sistema consente di mutare, anche frequentemente, l'insieme dei prodotti realizzati e i rapporti quantitativi fra i diversi prodotti;
- La flessibilità di prodotto: possibilità di introdurre e realizzare nuovi prodotti.

Il sistema presenta alcuni *punti di debolezza*, che sono tipici di una struttura organizzata a Job Shop:

- Difficoltà nella programmazione operativa: a fronte di un portafoglio ordini assegnato, occorre decidere in quale sequenza e in quale momento lanciare in produzione i lotti dei vari ordini; a fronte di diversi cicli tecnologici alternativi occorre decidere quale utilizzare, nel tentativo di bilanciare i carichi di lavoro sulle varie macchine; quando una macchina termina una lavorazione ed è pronta per lavorare un altro lotto, è necessario decidere quale lotto scegliere fra quelli in coda alla macchina, tenendo conto di vari elementi quali date di consegna, tempi di set-up, saturazione delle macchine a valle, ecc.;
- Elevato Work in Process (WIP): cioè un'elevata quantità di ordini in corso di lavorazione, iniziati ma non ancora terminati;
- Carichi di lavoro delle macchine molto oscillanti con possibile formazione di colli di bottiglia;
- Saturazione media delle macchine tendenzialmente bassa ad esclusione di particolari macchine la cui capacità è stata dimensionata in fase progettuale su alcuni prodotti sostanzialmente ripetitivi.

I componenti fabbricati all'interno dell'impianto produttivo sono destinati, in ultima fase, all'area di montaggio dove vengono assemblati per la realizzazione del prodotto finito.

CMS realizza un assemblaggio di tipo manuale e quindi il sistema è composto da un certo numero di stazioni, in ciascuna delle quali operano uno o più addetti, e da carrelli elevatori per lo spostamento dei componenti da montare da una stazione all'altra.

L'area di montaggio non verrà descritta nel dettaglio perché non è stata oggetto di analisi, essendo un'attività ottimizzata e standardizzata nel tempo da CMS le cui performance hanno già raggiunto livelli considerati ottimali dall'azienda.

B.6 Scelta KPI per CMS

Per monitorare un sistema produttivo organizzato per reparti o, centri di lavoro (CDL), nel caso in cui più tecnologie sono raggruppate sotto un'unica responsabilità, sono necessari

strumenti mirati, in grado di valutare le performance raggiunte da ogni singolo macchinario e di conseguenza, misurare le capacità di ciascun Team Leader nella gestione e nel coordinamento della produzione all'interno del proprio reparto o centro di lavoro.

L'indice OEE è lo strumento più adatto a tale situazione e attualmente utilizzato dall'azienda per la valutazione delle performance dei diversi reparti/centri di lavoro.

Il valore dell'OEE corrisponde alla capacità di identificare e quantificare le perdite di uno stabilimento produttivo. Comprenderle consente di ridurle e quindi di aumentare l'efficienza produttiva. Un sistema OEE si può considerare sufficientemente accurato se è in grado di spiegare almeno il 90% delle perdite.

Si è verificato che però CMS calcola l'indicatore come una percentuale assoluta, senza distinguere il contributo delle singole perdite e senza sfruttarne pertanto il reale significato.

Reparto	Team Leader	Raggruppamento	OEE	Rend Piazz	Rend Lav
SALDATURA ROBOTIZZATA	Team Leader 1	AGG. SA CARPENTERIA	92,96%	38,91%	92,97%
SALDATURA ROBOTIZZATA	Team Leader 1	ROBOT SA	69,90%	59,03%	70,25%
SALDATURA ROBOTIZZATA	Team Leader 1	SA CARPENTERIA	78,08%	39,49%	80,20%
SALDATURA ROBOTIZZATA	Team Leader 1	Team Leader 1 TOTALE	92,80%	41,67%	92,83%
TORNI	Team Leader 2	AGG. TORNI	75,86%	0,00%	77,35%
TORNI	Team Leader 2	ALTRE RISORSE	65,27%	23,34%	85,35%
TORNI	Team Leader 2	OMZ	55,93%	49,24%	61,94%
TAGLIO	Team Leader 2	TAGLIO	66,63%	0,00%	66,63%
TORNI	Team Leader 2	TO CONTROLLO	75,05%	71,39%	76,52%
TORNI	Team Leader 2	TO PARALLELI	73,27%	76,98%	70,99%
TORNI	Team Leader 2	Team Leader 2 TOTALE	68,45%	62,08%	70,75%
FRESE	Team Leader 3	DMF 360 LINEAR	64,39%	74,62%	56,93%
FRESE	Team Leader 3	JOBS LINX-30	37,08%	41,16%	85,06%
FRESE	Team Leader 3	MANDELLI REGENT 1001	78,63%	37,78%	80,23%
FRESE	Team Leader 3	TIGER TFA6	54,36%	50,05%	58,47%
FRESE	Team Leader 3	Team Leader 3 TOTALE	62,85%	59,46%	64,21%
CENTRI LAVORO	Team Leader 4	AGG. CARPENTERIA	83,92%	0,00%	83,96%
CENTRI LAVORO	Team Leader 4	JOBS LINX-O	83,13%	93,00%	82,67%
CENTRI LAVORO	Team Leader 4	MANDELLI REGENT 1200	58,47%	57,32%	58,66%
CENTRI LAVORO	Team Leader 4	ROBOT AG	89,18%	0,00%	91,31%
CENTRI LAVORO	Team Leader 4	SECMU 1000	59,60%	69,24%	58,00%
CENTRI LAVORO	Team Leader 4	TRATT. SUPERFICIALI	59,96%	0,00%	59,96%
CENTRI LAVORO	Team Leader 4	Team Leader 4 TOTALE	73,57%	66,73%	74,01%
CENTRI LAVORO 2	Team Leader 5	AGG. HECKERT	76,81%	0,00%	76,81%
CENTRI LAVORO 2	Team Leader 5	HECKERT	83,55%	73,39%	85,15%
CENTRI LAVORO 2	Team Leader 5	Team Leader 5 TOTALE	80,80%	73,39%	81,44%
SALDATURA	Team Leader 6	AGG. SA	73,61%	0,00%	73,93%
SALDATURA	Team Leader 6	SA	79,82%	61,91%	79,91%
SALDATURA	Team Leader 6	Team Leader 6 TOTALE	77,51%	40,93%	77,68%
THUNDER	Team Leader 7	AGG. THUNDER	85,09%	87,87%	85,03%
THUNDER	Team Leader 7	THUNDER	77,13%	78,74%	76,53%
THUNDER	Team Leader 7	Team Leader 7 TOTALE	79,72%	79,07%	79,87%
TOTALE CMS	TOTALE CMS	TOTALE COMPLESSIVO	66,67%	79,07%	79,87%

Tab.D.2 Report OEE

Il report prodotto mensilmente dall'azienda tab.B.2 evidenzia, per ogni reparto, tre indicatori: l'OEE, il rendimento di piazzamento (tempo teorico/tempo effettivo) e il rendimento di lavorazione (tempo teorico/tempo effettivo). Per ragioni di riservatezza, i valori di questi tre indici sono stati moltiplicati per un generico coefficiente compreso tra 0 e 1.

L'OEE così definito è però semplicemente un valore numerico che non fornisce particolari informazioni utili. Nasce quindi l'esigenza di approfondire e rivedere il calcolo dell'OEE e di procedere alla sua corretta implementazione a partire dalla fase di raccolta e analisi dei dati.

L'azienda ha maggiore interesse nella valutazione delle prestazioni di ogni singolo reparto, rispetto alla possibilità di analizzare le inefficienze lungo un intero processo produttivo o ciclo di lavorazione. Questo perché CMS è un'azienda che produce in genere per lotti molto diversi tra di loro e di piccole dimensioni quindi, dal momento che ogni lotto è caratterizzato da lavorazioni diverse, risulterebbe difficile cercare di migliorare l'efficienza dell'impianto produttivo agendo sulle performance relative a ogni lotto, è molto più efficace valutare il lavoro di ogni centro.

Il processo di identificazione dei KPI ha portato ai seguenti risultati:

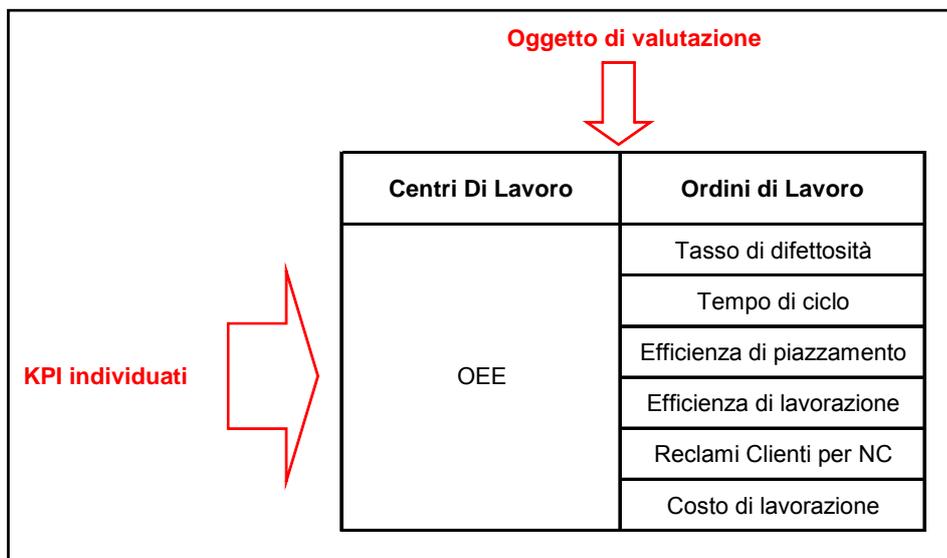


Figura B.6 KPI CMS Spa

B.7 Sistemi informativi aziendali

L'azienda svolge la propria attività avvalendosi di due particolari software integrati dedicati alla gestione dell'ambiente di produzione (Sistema GP90) e di quello amministrativo/gestionale (Sistema Strega).

I flussi informativi che permettono ai due sistemi di comunicare tra di loro possono essere rappresentati schematicamente nel seguente modo:

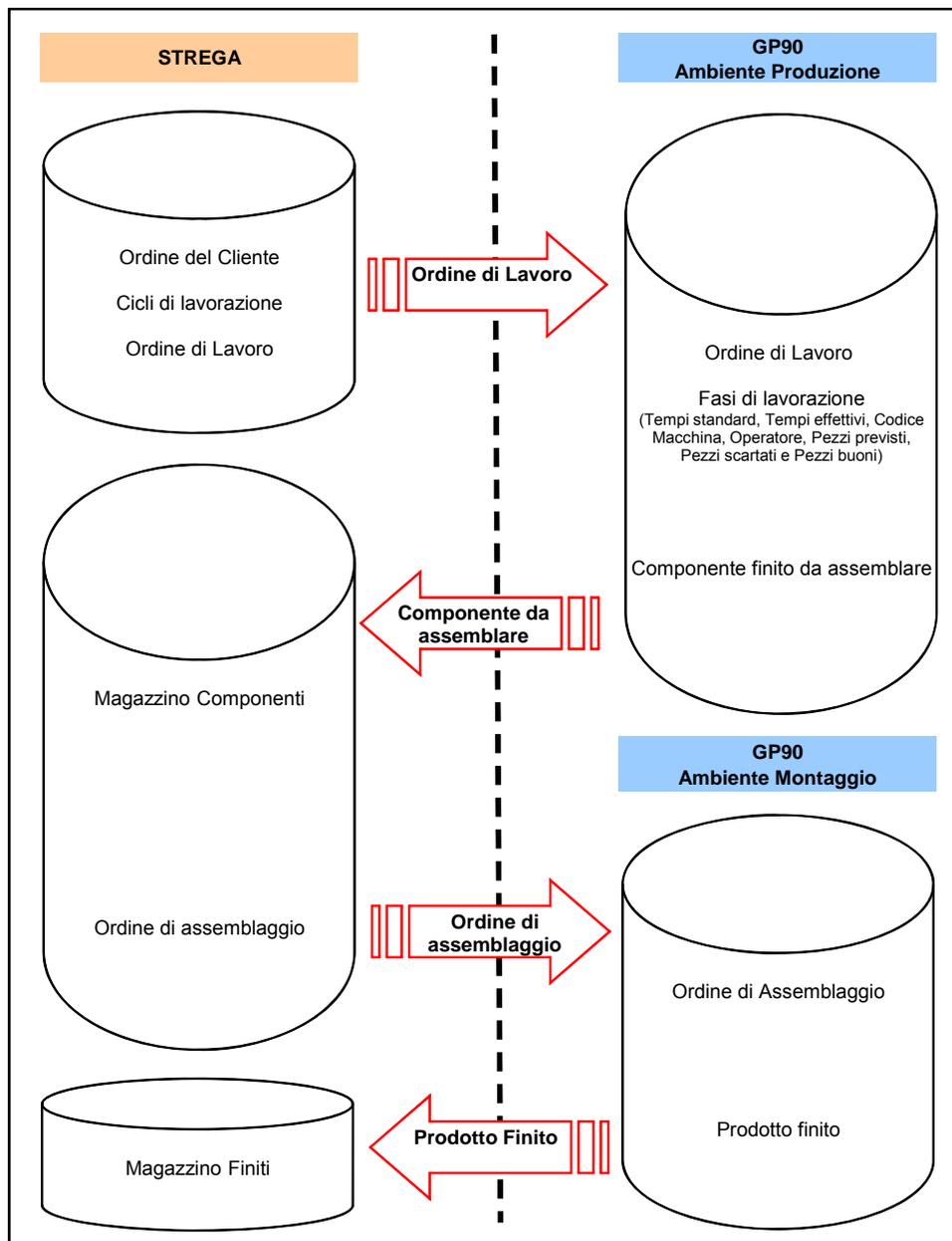


Figura B.7 Flusso informativo tra i sistemi

Tutte le informazioni necessarie per la costruzione dell'indice OEE si trovano all'interno del sistema GP90 – Ambiente Produzione.

La costruzione dell'indice OEE ha richiesto un'attenta analisi delle tecniche utilizzate dall'azienda per la rilevazione dei tempi di produzione che viene effettuata ancora manualmente e

di tutte le informazioni invece già disponibili a sistema, naturalmente cercando di assicurare la qualità e l'affidabilità dei dati.

B.8. Tecniche di rilevamento dei dati

I tempi delle attività che rientrano nel processo produttivo vengono rilevati manualmente dall'operatore tramite la lettura ottica di barcode.

I documenti basilari che guidano il processo produttivo di un componente sono gli ordini di lavoro che elencano tutte le fasi di lavorazione, il numero di pezzi da realizzare, i tempi standard di ogni fase e le risorse macchina impegnate in ogni fase del ciclo produttivo.

L'ordine di lavoro è un documento cartaceo che accompagna il componente lungo tutto il processo produttivo e viene utilizzato dagli operatori per dichiarare in ogni fase del ciclo l'inizio e la fine della lavorazione, il numero di pezzi conformi e il numero di pezzi scartati. In sostanza l'operatore, interagendo con un piccolo monitor, prima di iniziare la lavorazione deve marcare con il lettore ottico il suo cartellino (per dichiarare la risorsa uomo che svolgerà la fase), il tipo di attività che andrà ad eseguire (lavorazione, piazzamento, rilavorazione, ecc.) e infine la fase del ciclo. Allo stesso modo, terminata la lavorazione, l'operatore deve marcare l'attività di chiusura, inserire il numero di pezzi conformi e il numero di pezzi scartati.

Per marcare la fase di lavorazione, l'operatore utilizza l'ordine di lavoro mentre per dichiarare il tipo di lavorazione, il numero di pezzi e tutte le altre informazioni si avvale di una scheda "barcode".

Analogamente quando si verifica un'interruzione del flusso produttivo a causa di un arresto del macchinario per pulizia, manutenzione, guasto ecc., è necessario dichiarare il fermo macchina e la ragione che ha provocato la sospensione del processo produttivo.

Per fare questo, l'operatore si avvale di un particolare ordine di lavoro chiamato "Gestionale" dove le fasi identificano la tipologia del fermo macchina.

La lettura ottica tramite barcode comporta che l'affidabilità dei dati sia esclusivamente legata alla corretta esecuzione di tutte le procedure da parte dell'operatore. Gli operatori vanno pertanto opportunamente sensibilizzati, cosa che invece fino ad oggi l'azienda ha trascurato.

Il sistema informativo di CMS classifica i tempi di produzione in cinque categorie:

1. *Lavorazione*: tempo in cui la macchina è impegnata a lavorare il pezzo

2. *Piazzamento*: tempo di set-up necessario per smontare dalla macchina l'ultimo pezzo lavorato e piazzare quello successivo
3. *Rilavorazione*: tempo per rilavorare un pezzo dichiarato non conforme
4. *Lavorazioni Plurime*: tempo in cui l'operatore svolge contemporaneamente diverse fasi di lavorazione di cicli differenti sfruttando la capacità di alcune attrezzature di lavorare senza essere presidiate.
5. *Fermo macchina*: tempo in cui la macchina si arresta interrompendo il flusso produttivo (denominato dall'azienda "MUDA", termine tecnico della produzione industriale per indicare una perdita).

Causale Fermo Macchina	Descrizione
PULIZIA	Quando pulisco il banco/postazione di lavoro e le aree circostanti la macchina.
MANUTENZIONE ORDINARIA	Quando devo effettuare interventi di manutenzione programmati.
MANUTENZIONE STRAORDINARIA	Quando vengono effettuati interventi di manutenzione non programmati.
ATTESA MATERIALE	Quando sono costretto ad aspettare che il magazzino o un altro reparto mi consegni il materiale e sono impossibilitato a continuare il mio lavoro.
MATERIALE NON CONFORME INTERNO	Quando per motivi di materiale non conforme interno sono costretto ad aspettare e sono impossibilitato a proseguire il mio lavoro.
MATERIALE NON CONFORME ESTERNO	Quando per motivi di materiale non conforme esterno sono costretto ad aspettare e sono impossibilitato a proseguire il mio lavoro.
TRAINING	Quando sto insegnando ad un operatore come utilizzare la risorsa.
ATTIVITA' DI MIGLIORAMENTO	Quando sono coinvolto in progetti di miglioramento.
ATTESA COLLAUDO	Quando sono costretto ad aspettare in una postazione di lavoro che il collaudo mi dia il "benestare" e sono impossibilitato a continuare il mio lavoro.
ASSEMBLEA	Quando partecipo ad un'assemblea approvata dalla Direzione Generale durante il mio orario di lavoro.

Tab. D.3 Causali di "fermo macchina"

Nel caso di “fermo macchina” è possibile dichiarare la causa che ha provocato l’arresto della risorsa scegliendo una tra le seguenti causali presenti a sistema tab.D.3.

Il sistema GP90 offre la possibilità di gestire una molteplicità di informazioni riguardanti il sistema produttivo. Le sue potenzialità sono molto elevate, tuttavia non sono pienamente sfruttate dall’azienda che utilizza solo in parte gli strumenti che ha a disposizione.

Non è sempre scontato che i tempi di guasto e di manutenzione programmata siano evidenziati, per ogni macchinario, separatamente. Spesso accade che l’operatore dichiari il guasto e la manutenzione con un’unica causale di fermo macchina. Altre causali, diversamente, vengono utilizzate in modo improprio, senza un criterio guida.

Inoltre la modalità di rilevazione degli scarti e delle rilavorazioni, oltre ad essere molto complessa, non viene applicata in modo coerente in tutte le celle di lavorazione e questo contribuisce a determinare una base dati poco affidabile.

Gli scarti e le rilavorazioni misurano la qualità di un processo produttivo e possono essere legati a diversi fattori quali:

- errore dell’operatore;
- usura degli utensili;
- modifica delle specifiche da parte del cliente;
- ecc.

La procedura seguita in CMS per tracciare le non conformità e le rilavorazioni può essere descritta distinguendo due principali casistiche

- *Rilavorazione su prodotto non conforme*

In seguito alla quale:

1. il pezzo viene ri-lavorato e il tempo della rilavorazione viene sommato al tempo ciclo di produzione (in questo caso la rilavorazione non viene tracciata a sistema);
2. la rilavorazione viene tracciata a sistema attribuendo la causale BS alla macchina che effettua la rilavorazione (questo determina una duplicazione delle risorse, ovvero ad ogni macchina vengono associati 2 codici: il codice della macchina es. EE-01-01 “Elettroerosione” e il codice della rilavorazione es. EE-00-BS “Rilavorazione Elettroerosione”);
3. la rilavorazione è troppo complessa e quindi necessita dell’apertura di un nuovo ciclo che corrisponde alla generazione dell’ordine di lavoro così detto TBMD.

- *Rilavorazione su prodotto conforme*

può verificarsi nel momento in cui il cliente chiede all'azienda una modifica delle specifiche iniziali.

Se la modifica è attuabile, viene aperto un nuovo ordine di lavoro del tipo TBMD, diversamente, se il pezzo non può essere rilavorato, viene attribuita al codice la causale "OB" ossia non recuperabile.

Un altro problema che si aggiunge alla procedura di rilevazione degli scarti e delle rilavorazioni riguarda le marcature degli operatori, i quali non sempre dichiarano i pezzi non conformi.

Sulla base di tutte queste osservazioni, è stata elaborata insieme all'azienda una nuova procedura di rilevazione di più facile applicazione che è stata condivisa con i Team Leader e distribuita all'interno del reparto produttivo.

B.9 Nuova procedura per il calcolo dell'OEE

La nuova procedura è stata testata su due centri di lavoro che al loro interno processano i prodotti di maggiore valore. Questi centri di lavoro realizzano quattro componenti base (colonna, cassa, telaio e bagno) che vengono assemblati per ottenere un componente che costituisce un sotto-sistema delle macchine automatiche di confezionamento degli alimenti dell'azienda Tetra Pak. La giacenza in magazzino di questi quattro componenti e dei loro semilavorati è gestita a Kanban.

Il primo centro di lavoro, che verrà chiamato "CDL 1", è seguito e coordinato da un solo Team Leader e comprende al suo interno le seguenti macchine/reparti:

- CDL automatizzato multi-pallet per lavorazioni meccaniche di fresatura;
- Robot di sbavatura;
- Cella manuale di sbavatura;
- Decapaggio;
- Elettrolucidatura.

Il secondo centro di lavoro, che verrà chiamato "CDL 2", è anch'esso seguito e coordinato da un solo Team Leader e comprende al suo interno le seguenti macchine/reparti:

- Robot di saldatura;
- Cella manuale di saldatura;
- Radrizzazione.

I componenti base che vengono processati attraverso questi centri di lavoro sono caratterizzati dal medesimo ciclo tecnologico rappresentato graficamente nel diagramma in figura x.

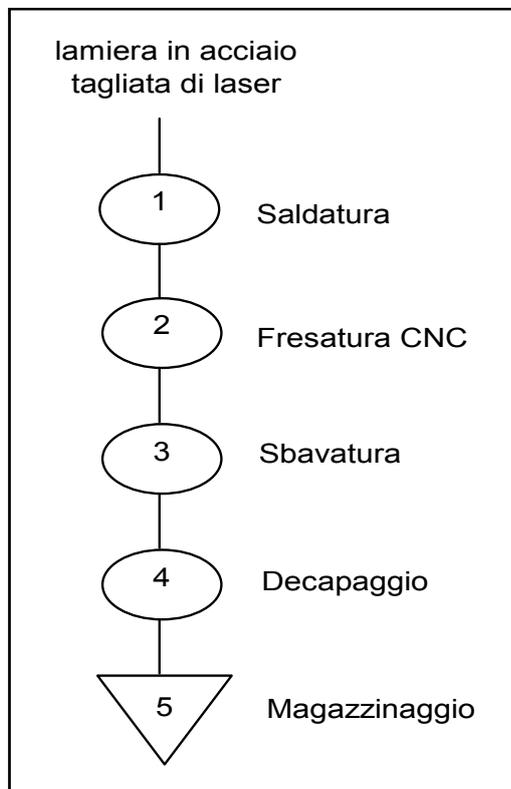


Figura B.8 Diagramma del processo

L'input del processo è una lamiera piegata o piana di acciaio inox già tagliata con il Laser che, nella prima fase, viene saldata con altri componenti principalmente in modo automatico, utilizzando un robot appositamente programmato per eseguire la lavorazione. Solo in alcuni casi si ricorre alla saldatura manuale (ad esempio nel caso di emergenze o prototipi per evitare di istruire il robot). L'output è un manufatto grezzo, geometricamente e dimensionalmente diverso a seconda del componente base da realizzare, che nella fase 2 viene fresato in un centro di lavoro automatizzato e successivamente inviato al robot di sbavatura. Questo robot esegue sul pezzo una pulizia meccanica per rimuovere eventuali bave e spigoli vivi e per ridurre la rugosità superficiale. Anche in questo caso per eseguire particolari operazioni è possibile ricorrere alla cella manuale di sbavatura in modo da evitare di programmare il robot.

L'ultima lavorazione consiste in un'operazione di decapaggio, ovvero di pulizia chimica del pezzo per rimuovere gli ossidi generati con la saldatura ed eliminare eventuali particelle di altri materiali in generale presenti nell'ambiente di lavorazione.

L'output finale di questo processo (composto saldato di carpenteria pesante) viene immagazzinato in attesa di essere montato con gli altri componenti base per ottenere il modulo della macchina Tetra Pak.

B.10 Calcolo OEE

1) Definizione delle modalità di calcolo

Le ipotesi introdotte per la determinazione dei vari parametri che concorrono al calcolo dell'OEE in CMS sono:

- *Tempo di Funzionamento Teorico dell'impianto:* pari al tempo consuntivo di funzionamento del macchinario;
- *Rilavorazione interna:* una rilavorazione si definisce interna quando il pezzo difettoso può essere riparato dalla stessa macchina che lo ha generato. E' stata definita come una perdita di tempo che incide sul parametro OEE delle "Prestazioni", diversamente da quanto affermato in letteratura dove la rilavorazione viene considerata una perdita di qualità. Il significato di questa assunzione consiste nel fatto che la rilavorazione è un'operazione che permette di rimediare ad un errore evitando di generare una non conformità, quindi può essere considerata come un tempo addizionale speso per realizzare il medesimo pezzo.
- *Rilavorazione esterna:* si parla di rilavorazione esterna quando un pezzo dichiarato difettoso necessita di essere riparato utilizzando un macchinario diverso da quello che ha generato la non conformità. In questo caso, la rilavorazione viene considerata come un semplice ordine di lavoro che il macchinario è chiamato ad eseguire.
- *Piazzamento:* solo la frazione di tempo che supera il tempo standard definito nel ciclo di lavorazione viene considerata una perdita che incide sul parametro OEE delle "Prestazioni". Questa assunzione è spiegata dal fatto che il tempo standard di piazzamento viene conteggiato nel calcolo del costo di produzione e quindi ricade sulla determinazione del prezzo di vendita del prodotto.

Le ipotesi sono state formulate per fare aderire l'OEE alla realtà CMS, caratterizzata da determinate peculiarità che devono essere evidenziate e tenute in considerazione per ottenere un indicatore rappresentativo e in grado di comunicare oggettivamente le prestazioni dell'impianto produttivo.

2) Costruzione della base dati

La base di dati utilizzata per il calcolo dell'OEE è strutturata nelle seguenti voci:

- *Centro di Costo*: reparto che realizza la lavorazione (es. Torni, Saldatura leggera, Saldatura pesante, Taglio, CDL1 ecc.);
- *Operatore*: codice associato all'operatore che realizza la lavorazione;
- *Descrizione*: nome dell' operatore che realizza la lavorazione;
- *Inizio*: data e ora di inizio della lavorazione;
- *Fine*: data e ora di fine della lavorazione;
- *Codice OL*: codice associato all'ordine di lavorazione (es: GEST+NUM: ordine così detto gestionale che viene aperto per effettuare attività di gestione come la pulizia, le riunioni, i corsi di formazione; KB+NUM: ordine Kanban; OL+NUM: ordine standard di lavorazione; TBMD+NUM: ordine di ri-lavorazione esterna per modifica delle specifiche da parte del cliente; TRIP+NUM: ordine di ri-lavorazione esterna per non conformità generata dall'impianto produttivo);
- *Codice*: codice del pezzo da realizzare;
- *Proc.*: tipologia di operazione eseguita sulla macchina (LP: lavorazioni plurime; PL: lavorazione; PZ: piazzamento; BS: Rilavorazione; AV: Avviamento del primo pezzo; VA: Varie per la registrazione dei Muda);
- *Macchina*: codice della macchina che esegue la lavorazione;
- *Fase*: codice della fase di lavorazione (una macchina nello stesso OL può eseguire più fasi di lavorazione);
- *Pezzi previsti*: numero di pezzi teoricamente da produrre in ogni fase;
- *Pezzi buoni*: numero di pezzi conformi realizzati in corrispondenza di ogni fase di lavorazione;
- *Pezzi scartati*: numero di pezzi non conformi realizzati in corrispondenza di ogni fase di lavorazione;
- *Tempo standard di piazzamento*: tempo teorico di piazzamento calcolato per ogni fase di lavorazione
- *Tempo standard unitario di lavorazione*: tempo teorico di lavorazione calcolato per ogni fase di lavorazione;
- *Tempo effettivo*: tempo reale di produzione calcolato per ogni fase di lavorazione e registrato dagli operatori tramite la lettura ottica di barcode;

3) OEE

A partire da una base dati affidabile è possibile procedere al calcolo corretto dell'OEE.

Si riporta in figura x il modello consegnato all'azienda come documento ufficiale per il calcolo dell'indice OEE in base al quale l'azienda può monitorare le prestazioni di tutte le attrezzature produttive. Questo modello è stato costruito in modo specifico per essere applicato alla realtà produttiva di CMS ed è. I dati riportati nello schema seguente hanno la sola finalità illustrativa.

Simulazione OEE in CMS						
Attività	Descrizione	Qc (pz)	Qnc (pz)	N (pz)	Tc (h/pz)	Tempo standard (h) Tempo Effettivo (h)
MUDA	Fermo Macchina					7,1
PZ	Piazzamento	1	0	1	2	2
PL	Lavorazione	10	4	14	1	14
BS	Ri-lavorazione	3	1	0	1	0
TRIP	Ri-lavorazione Interna	3		3	0,5	1,5
TBMD	Ri-lavorazione Esterna	1		1	2	2
AV	Avviamento	1	0	1	5	5
		19	5	20		24,5 47
Disponibilità						84,89%
Prestazioni						61,40%
Qualità						95,00%
OEE						49,52%

Perdite di Disponibilità			
	Perdite	incidenza %	
Manutenzione	10,00%	66%	
Attesa Collaudo	5,11%	34%	
Tot perdite	15,11%	100%	

Perdite di Prestazioni			
	Perdite	Rendimento	incidenza %
Avviamento	2,51%	83,33%	6%
Lavorazioni	27,57%	56,00%	71%
Piazzamento	1,25%	80,00%	3%
TRIP	0,00%	100,00%	0%
TBMD	1,00%	83,33%	3%
Rilavorazioni	6%	0%	16%
Tot perdite	38,60%		100,00%

Perdite di Qualità	
Pezzi Buoni	19,00
Pezzi Scarti	1,00

Fig. B.9 Simulazione OEE

I dati necessari per il calcolo dell'OEE sono pertanto:

- Il tempo di funzionamento dell'impianto pari alla somma dei tempi effettivi registrati in ogni attività ossia $LT = 47$ ore;
- Il tempo di fermo macchina pari a $DT = 7.1$ ore;
- Il numero di unità conformi $Q_C = 19$ pezzi;
- Il numero totale di unità prodotte $N = 20$ pezzi;

A questo punto è possibile determinare l'efficienza del macchinario applicando le formule seguenti:

$$\text{Disponibilità: } AEF = \frac{(47 - 7.1)}{47} = 84.89\%$$

$$\text{Prestazioni: } PEF = \frac{(24.5)}{47 - 7.5} = 64.40\%$$

$$\text{Qualità: } QEF = \frac{19}{20} = 95.00\%$$

$$OEE = 84.89\% \times 64.40\% \times 95.00\% = 49.52\%$$

I tre riquadri sottostanti al modello, evidenziano come le perdite di efficienza in termini di Disponibilità, Prestazioni e Qualità dell'impianto siano distribuite sulle diverse attività generatrici. In poche parole si cerca di capire con quale incidenza (%) ciascuna attività contribuisca a ridurre la Disponibilità, le Prestazioni e la Qualità del macchinario. Solo in questo modo è possibile determinare i processi critici su cui agire per aumentare il valore dell'indicatore OEE.

B.11 Calcolo Efficienza CDL 1 e CDL 2

Per ogni macchinario appartenente ai CDL suddetti sono stati calcolati i valori di Disponibilità, Prestazione e Qualità in modo da ottenere il relativo OEE e determinare l'efficienza complessiva dei Centri di Lavoro.

In particolare, tramite Excel, sono stati elaborati dei Report di analisi per ogni macchinario, e successivamente tutte le informazioni sono state sintetizzate in un grafico per mettere in evidenza le performance complessive dei Centri di Lavoro.

I grafici di sintesi vengono riportati in figura B.10 e B.11.

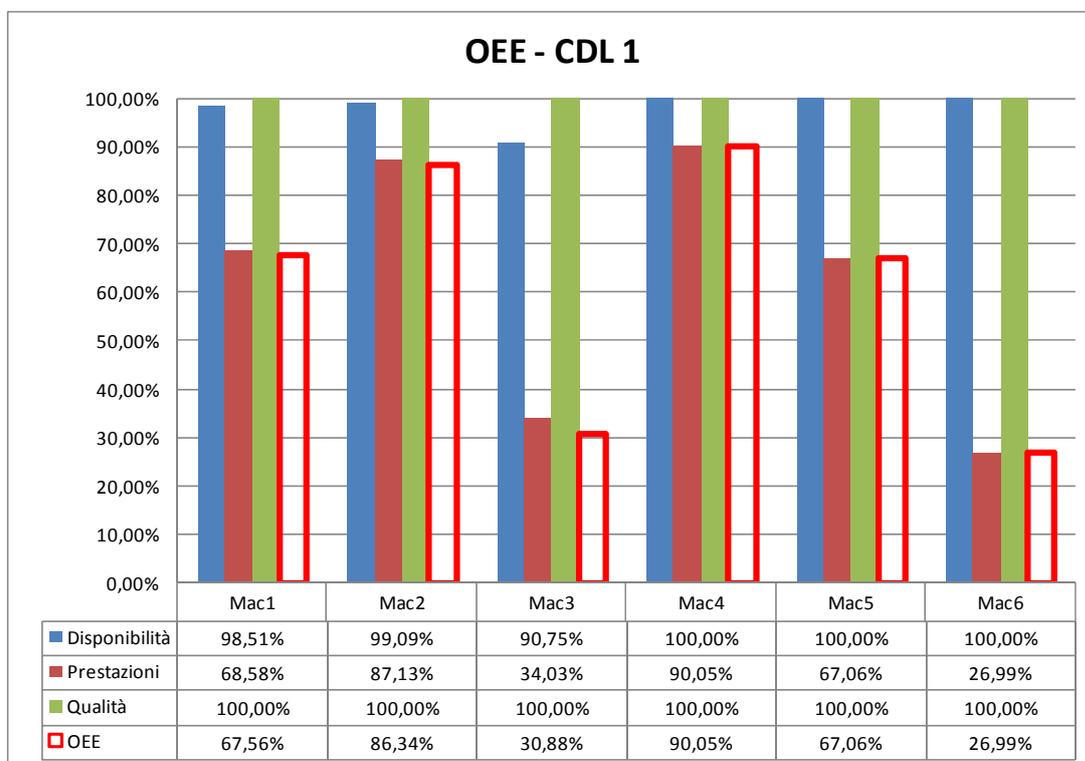


Fig.B.10 OEE – CDL 1

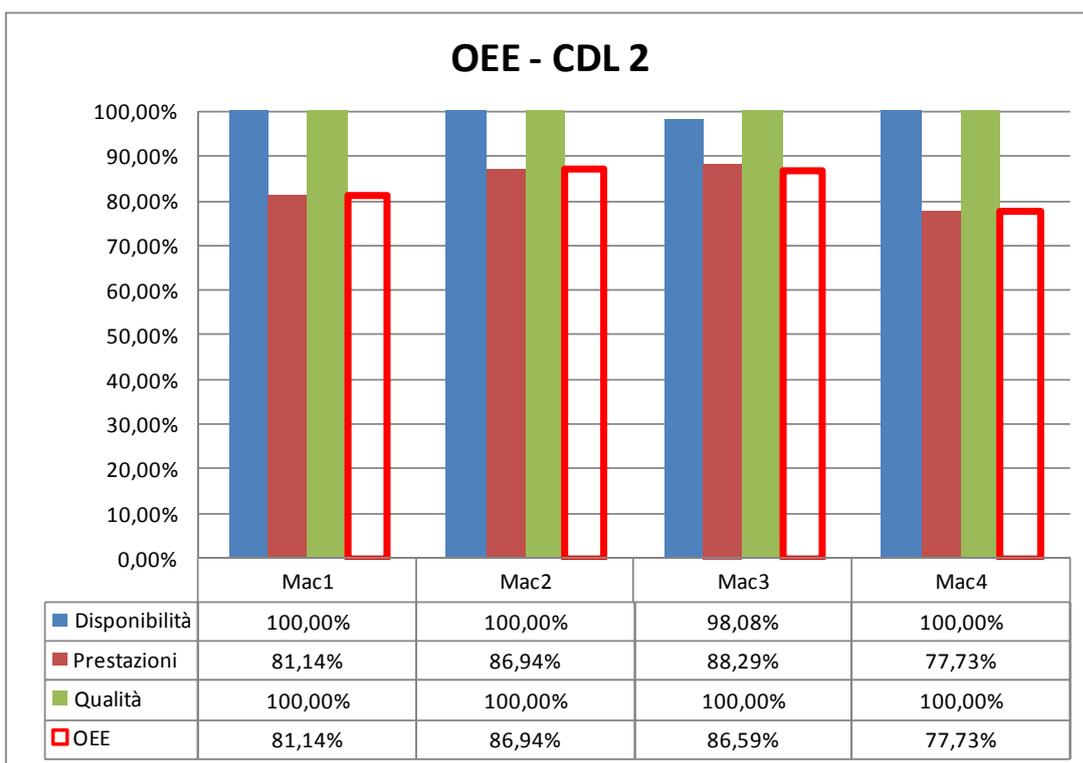


Fig.B.11 OEE – CDL 2

Nei due grafici è possibile individuare per ciascun macchinario dei due centri di lavoro esaminati che cosa determina una scarsa efficienza tra disponibilità, prestazioni e qualità cioè in altri termini che tipo di perdite subisce la macchina CHE dovranno quindi essere limitate e possibilmente annullate. Questa interpretazione consente pertanto ai manager di intraprendere le necessarie azioni correttive.

B.12 Conclusioni

L'OEE verrà calcolato dall'azienda in base alla nuova procedura per l'intero impianto produttivo, escludendo solo i processi che di fatto non hanno margini di miglioramento, come il decapaggio. Questa attività infatti, è caratterizzata dall'esecuzione regolare di operazioni la cui durata è una variabile indipendente, ossia imposta dal processo galvanico, che viene stabilito a priori dall'ufficio qualità e su cui l'operatore/impianto non ha margini di manovra.

L'indice verrà calcolato con una frequenza mensile, infatti tale periodo rispecchia il lead time medio di produzione degli articoli processati dall'azienda. Si utilizzerà una modalità di calcolo automatico su una piattaforma di DataWarehouse (Hyperion).

L'OEE è uno strumento di controllo che agirà su due livelli di analisi:

1. *Analisi di dettaglio*: ogni mese verranno prodotte delle reportistiche di dettaglio per ogni CDL che verranno analizzate dal manager dell'area produttiva per approfondire le ragioni di inefficienza e stabilire le azioni di miglioramento per ciascun centro di lavoro;
2. *Analisi globale*: ogni mese verranno elaborati dei grafici, come quello riportati, che saranno appesi nella bacheca dell'impianto produttivo per comunicare a tutto il personale dello stabilimento il livello delle prestazioni raggiunte e gli scostamenti rispetto agli obiettivi prefissati.

In seguito a questo studio pertanto l'azienda riconosce nell'OEE uno strumento in grado di rispondere alle proprie esigenze in termini di controllo delle performance e identificazione delle opportunità di miglioramento della produzione.

ALLEGATO C Elenco completo di definizioni e formule degli indicatori di prestazione produttiva

INDICATORE	DESCRIZIONE	FORMULA	GRANDEZZE
Lateness	Sfasamento temporale tra la data di completamento del lotto e la data di consegna	$L_j = C_j - d_j$	j = lotto Cj = data di completamento dj = data di consegna
Tardiness	Segnala un ritardo se $T_j > 0$	$T_j = \max(0; L_j)$	
Lateness medio	obiettivo: $L_m = 0$	$L_m = (\sum L_j) / N$	N = numero di lotti
Tardiness medio	obiettivo: min Tm	$T_m = (\sum T_j) / N$	N = numero di lotti
NR	NR di lotti in ritardo	$NR = (\sum X(T_j))$	$X(t_j) = 1$ se $T_j > 0$ oppure 0 se $T_j < 0$
MakeSpan	Tempo totale che N lotti trascorrono nel sistema. Obiettivo: min MAK	$MAK = \max C_j - \min l_j$	lj = data di ingresso del lotto nel sistema Cj = data di completamento
Csi	Coefficiente di saturazione delle singole macchine	$Csi = (\sum t_{ij}) / MAK$	i = macchina, j = lotto t _{ij} = tempo di lavorazione del lotto j sulla macchina i
CStot	Coefficiente di saturazione totale del sistema	$CStot = (\sum Csi) / M$	i = macchina M = Numero di macchine
WIP	Working Progress. Numero di lotti che vengono contemporaneamente lavorati	$WIP = \int WIP(t) dt / (b - a)$	a = min lj, b = max Cj (b-a) = MAK
SU	Tempo di set-up complessivo	$SU_i = \sum SU_i$	i = macchina
MLT	Manufacturing Lead Time	$MLT = \sum_{i=1}^{n_m} (T_{su_i} + Q \cdot T_{o_i} + T_{no_i})$ $MLT = n_m \left(T_{su} + \left(\frac{Q}{1-q} \right) \cdot T_o + T_{no} \right)$	Tsu = tempo di set-up di ogni macchina n _m = numero di macchine utilizzate per la produzione del lotto Q = pezzi/lotto To = tempo operativo di lavorazione Tno = Tempo non operativo q = coefficiente di scarto
TP	Tempo medio di produzione per pezzo	$TP = (Tsu + Q \times To) / Q$	
Rp	Tasso di produzione	$Rp = 1 / TP$	
Tc	Tempo ciclo teorico che viene calcolato nella stazione che presenta il tempo di processamento più lungo	$Tc = \text{tempo di lavoro} + \text{tempo a vuoto} + \text{tempo di attraversamento}$	
TP	Tempo di produzione in linea	$T_p = T_c + \sum_{d=1}^j F_d \cdot T_d$	Fd = frequenza con cui si verificano i breakdown Td = tempo di diagnosi e intervento
E	Efficienza della linea	$E = Tc / TP$	
D	Downtime della linea	$D = \frac{FT_d}{T_p} = \frac{FT_d}{T_c + FT_d}$	
PC	Plant Capacity. Capacità produttiva teorica . Numero di pezzi che possono essere realizzati nel tempo di riferimento	$PC = W \times Sw \times H \times Rp$	W = numero di unità produttive Sw = numero di turni di lavoro nell'intervallo di riferimento (ad es. una settimana) H = numero di ore per turno. Rp = tasso di produzione
U	Coefficiente di utilizzazione dell'impianto	$U = \text{output} / PC$	
WIP	Numero di unità contemporaneamente presenti nel sistema	$WIP = \frac{PC \cdot u}{S_w \cdot H} \cdot MLT$	
WIP ratio	Code di attesa alla macchina	WIP / NR di macchine in funzione	
TIP ratio	Time in Process. Tempo di attraversamento del pezzo per ogni macchina	$MLT / (n_m \times T_o)$	
Cp	Costo unitario di fabbricazione	$Cp = Cm + Cl \times Tp + Ct + \text{altri}$	Cm = costo unitario dei materiali Cl = costo unitario di lavoro della linea Tp = Tempo medio di produzione del pezzo Ct = costo utensili per unità Altri = costo di ispezione, risoluzione problemi...
P	Produttività del sistema	$P = \text{output} / \text{input}$	
E	Efficienza del sistema	$E = \text{Fattori teorici} / \text{Fattori reali impegnati}$	
A	Disponibilità del sistema produttivo	$A = UT / (UT + DT)$	UT = Up-Time, DT = Down-Time
F	Affidabilità del sistema produttivo. Probabilità che dopo un intervallo preciso di tempo il sistema sia ancora funzionante	$R(t) = e^{-\lambda t}$	λ = rateo di guasto, t = tempo di missione
M	Manutenibilità del sistema. Probabilità cumulativa di aggiustare il sistema in un certo intervallo di tempo	$G(t) = e^{-\mu t}$	μ = rateo di aggiustamento, t = tempo di missione

ALLEGATO D **Calcolo dell'OEE tramite metodi di Intelligenza Artificiale**

Il calcolo degli indicatori OEE in automatico è passato attraverso tre generazioni [156]. La prima generazione non prevedeva l'integrazione con la macchina oggetto della misura pertanto il costo risultava in genere elevato perché dovevano essere acquistati e installati i sensori e la licenza per ogni stazione di monitoraggio. Il difetto principale di questi primi sistemi per il calcolo dell'OEE è che fornivano semplicemente il valore dell'indicatore senza fornire una metodologia di analisi delle cause.

I sistemi di seconda generazione hanno presentato un significativo miglioramento grazie allo sviluppo dell'hardware PLC (Programmable Logic Computer), computer industriale che controlla il processo di fabbricazione, con il risultato di una maggiore integrazione disponendo dei sensori già sulle macchine. Anche questo tipo di soluzione richiedeva però forti investimenti non sostenibili per le piccole imprese senza peraltro sensibilmente migliorare l'analisi della causa.

I sistemi di terza generazione nascono grazie allo sviluppo di prodotti Microsoft a portata di qualsiasi produttore, dati i costi più ridotti. La piramide che rappresenta tali sistemi è rappresentata nella seguente figura dove si nota la maggiore capacità di analisi delle cause della prestazione.



Fig. D.1 Il calcolo dell'OEE utilizzando sistemi di terza generazione [156]

Uno dei componenti chiave di questi sistemi di terza generazione è il modello di stato PackML sviluppato da OMAC (The Organization for Machine Automation and Control, NC, USA) basato su un approccio di tipo olistico, che contiene stati predefiniti per indicare la

condizione della macchina. Gli stati in cui la macchina non è disponibile per la produzione forniscono informazioni vitali per individuare le cause delle perdite e quindi dell'inefficienza della macchina stessa. PackML può essere implementato su qualsiasi tipo di PLC. PackML si basa sui seguenti punti:

- uno stato definisce completamente le condizioni correnti di una macchina;
- una transizione tra stati può essere il risultato di un comando, di un cambiamento di stato oppure avviene in automatico dopo che non è stato eseguito un comando;
- uno stato finale rappresenta uno stato sicuro; per esempio quando non si muovono parti
- uno stato di 'transito' rappresenta un'attività del processo;
- uno stato inerte è utilizzato per indicare quando una macchina raggiunge un insieme di condizioni che corrispondono ad un fermo.

In questo contesto è stata sviluppata una visualizzazione Plug-and-Pivot che consente di visualizzare i diversi livelli di analisi, raggiungendo il massimo livello di integrazione tra macchina e utente e aumentare significativamente la disponibilità della macchina. Infatti è stato osservato che quando un operatore conosce gli effetti del suo comportamento sulle performance e sulla redditività, la produttività cresce. Plug-and-Pivot è un'interfaccia utente che facilita l'operatore permettendogli di utilizzare i dati essenziali della macchina. L'utente può assumere il controllo totale della macchina in remoto e riducendo il costo di manutenzione e di esercizio. Il sistema inoltre è in grado di eseguire un routing intelligente per individuare lo specialista più adatto a risolvere eventuali condizioni di allarme.

Il Plug-and-Pivot fornisce costituisce pertanto uno strumento efficace per il monitoraggio delle prestazioni della linea produttiva, per la diagnosi e per l'analisi dei problemi, in quanto i dati forniti possono essere utilizzati per individuare le possibili soluzioni. Sono molti i produttori che hanno realizzato PC di controllo che utilizzano il sistema operativo Windows XP, quali Siemens, Rockwell Software, ELAU, etc. Su questi PC è possibile integrare il controllo con le tecnologie Plug-and-Pivot.

L'architettura dei sistemi OEE di terza generazione è quindi rappresentabile nella figura D.2.

Il costo complessivo dell'implementazione di questi sistemi è qualche migliaio, circa tre volte inferiore a quello di un'applicazione di seconda generazione. Nel caso in cui un utente voglia visualizzare in remoto i dati può installare una rete Ethernet e collocando la tecnologia Plug-and-Pivot su un server aziendale, rende i dati visibili per tutti gli utenti senza costi aggiuntivi.

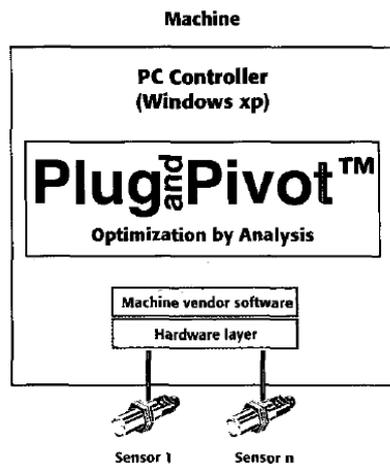


Fig.D.2 Topologia Plug and Pivot [156]

In conclusione si può affermare che i sistemi di terza generazione utilizzati per il calcolo dell'indice Overall Equipment Effectiveness forniscono notevoli vantaggi. Sono facilmente implementabili ad un costo inferiore rispetto a sistemi precedenti e comprendono applicazioni software intelligenti sviluppate dalla Microsoft e reperibili gratuitamente con una licenza di Office Professional, in grado di aiutare l'utente nella definizione dell'indice OEE e mettendo poi a disposizione su tutta la rete aziendale i dati considerati fondamentali per il calcolo. Sono attesi ulteriori miglioramenti che potranno con lo sviluppo ulteriore degli strumenti di Intelligenza Artificiale utilizzabili in questo contesto.

ALLEGATO E Casi aziendali di Trasferimento di Tecnologia

Si sono analizzati alcuni casi di aziende italiane che nell'ottica di una strategia di internazionalizzazione hanno operato un trasferimento di tecnologia ad uno stabilimento produttivo all'estero. L'analisi è finalizzata a dimostrare quanto l'importanza della complessità influenzi le operazioni di T.T. e le motivazioni dell'azienda a localizzare la produzione di prodotti o parti di esso presso uno stabilimento all'estero.

E.1 IMA

IMA è un'azienda bolognese leader mondiale nel campo della progettazione e produzione di macchine automatiche per le industrie farmaceutiche e del tè.

Lo stabilimento cinese è stato fondato dalla casa madre nel 1996 al fine di produrre in Cina alcuni componenti delle macchine per ridurre il prezzo di vendita complessivo.

La motivazione principale è stata quindi quella di potere disporre di un costo ridotto della manodopera rispetto all'Italia, oltre che naturalmente ubicare uno stabilimento produttivo in un'area commercialmente e strategicamente sempre più importante quale la Cina.

Si è analizzata in particolare la macchina ZANASI 40F, incapsulatrice a movimenti alternati, che confeziona capsule di gelatina dura divise in due metà, le cui caratteristiche principali sono la capacità di dosaggio di vari prodotti nella stessa capsula e una produzione: 40000 capsule/ora.



Fig.E.1 Macchina opercolatrice Zanasi 40F

Obiettivo che ci si pone è ridurre il costo della macchina, incrementando il numero di componenti prodotti in Cina verificandone prima la fattibilità in base alle risorse disponibili in loco.

Le fasi dell'analisi sono le seguenti:

1. Individuazione dei componenti al momento prodotti in Italia di cui trasferire la produzione presso la sede cinese
2. Analisi distinte tecniche e cicli di lavorazione dei gruppi scelti così come fabbricati in Italia
3. Adattamento dei cicli di produzione italiani alla attuale officina cinese
4. Calcolo incidenza oraria annua dei gruppi sulla produzione cinese e verifica della necessità o meno di nuovi investimenti
5. Calcolo dei costi dei componenti prodotti nella sede cinese
6. Verifica riduzione dei costi e conclusioni

Descrizione	Analisi costi per singola macchina costruita completamente in ITALIA	Costo standard
Z25/40 E-F MACCHINA BASE		27.184,68
Z40F PARTI AGGIUNTIVE MACCHINA BASE		134,18
Z40E-F PARTI AGGIUNTIVE MACCHINA BASE		1.245,68
Z25/Z40E-F PARTI AGGIUNTIVE MACCHINA BASE SENZA 3VT		1.193,42
Z25E-F/Z40E-F PARTI AGGIUNTIVE CON VASCA ROTANTE		957,68
Z40E-F SCIVOLO CAPSULE SENZA SELEZIONE PRELIEVO CAPSULE		529,16
Z25/40F MATERIALE ELETTRICO STANDARD		5.214,30
Z25F/Z40F MATERIALE ELETTRICO PER POLVERE		44,61
Z25E-F/Z40E-F MATERIALE ELETTRICO 380V		335,53
Z25F/Z40F CORREDO MACCHINA SOLO STANDARD		217,62
Z25/40 E-F MATERIALE ELETTRICO BASAMENTO STD/UL		1.239,94
Z25E-F/Z40E-F PARTI AGGIUNTIVE SENZA IL GRUPPO PESO		127,35
Z25/40E-F CAPPA DI PROTEZIONE		1.602,31
Z25E-F/40E-F GRUPPO POMPA PER CREARE VUOTO		1.084,38
AZ/25 CAPPA PARTI DI AGGIUNTA SENZA GRUPPI		15,14
ZLAB 8/16 GRUPPO ASPIRATORE 50 HZ		717,23
BOCCHETTA ASPIRAZIONE SETTORE VASCA POLVERE		117,57
Z40E-F ATTREZZATURA PER L'ALIMENTAZIONE E L'ORIENTAMENTO DELLE CAPSULE		1.976,87
Z40E-F/Z48 ATTREZZATURA PER IL DOSAGGIO POLVERE		1.354,05
COSTO TOTALE (euro)		45.291,70

Tab.E.1 Costo macchina Zanasi 40F interamente costruita in Italia.

Nella tabella B.1 Si riportano i costi di produzione dei singoli componenti costituenti la macchina Zanasi 40F qualora fabbricati in Italia. I componenti in nero in realtà vengono già fabbricati in Cina. Quelli in blu trattandosi prevalentemente di materiale elettrico che deve rispettare alcune normative CEE non possono essere fabbricati in Cina.

Descrizione	Analisi costi per singola macchina con KIT prodotto in Cina	Costo standard
KIT Z 40 E-F CINA		23.277,98
Z25/40F MATERIALE ELETTRICO SOLO STANDARD		5.214,30
Z25F/Z40F MATERIALE ELETTRICO PER POLVERE		44,61
Z25E-F/Z40E-F MATERIALE ELETTRICO 380V		335,53
Z25F/Z40F CORREDO MACCHINA STANDARD		217,62
Z25/40 E-F MATERIALE ELETTRICO BASAMENTO STD/UL		1.239,94
Z25E-F/Z40E-F PARTI AGGIUNTE SENZA IL GRUPPO PESO		127,35
Z25E-F/40E-F GRUPPO POMPA PER CREARE IL VUOTO		1.084,38
ZLAB 8/16 GRUPPO ASPIRATORE 50 HZ		717,23
BOCCHETTA ASPIRAZIONE SETTORE VASCA POLVERE		117,57
Z40E-F ATTREZZATURA PER L'ALIMENTAZIONE E L'ORIENTAMENTO DELLE CAPSULE		1.976,87
Z40E-F/Z48 ATTREZZATURA PER IL DOSAGGIO POLVERE		1.354,05
COSTO TOTALE (euro)		35.707,43

Tab.E.2 Costo macchina Zanasi 40F così come attualmente costruita in Cina (Kit in nero) e in Italia (parti in blu e in rosso attualmente in esame).

La riduzione di costo dovuta alla fabbricazione dei componenti riportati in tabella B.1 in nero presso la sede cinese è già pari al 21,16% come si può constatare confrontando le due tabelle.

Fasi dell'analisi ai fini del trasferimento di tecnologia

Fase 1. I componenti in oggetto di cui si vuole calcolare fabbricabilità e costo in Cina sono quelli riportati in rosso nella tabella B.2 e fotografati in fig. B.2 e B.3.

Fase 2. Si esaminano i cicli di lavorazione dei due gruppi in Italia.

Fase 3. Si verifica la fattibilità dei cicli in Cina, considerando le risorse di produzione al momento a disposizione in loco. Viene stimata una maggiorazione del 20% dei tempi di piazzamento e di

lavorazione manuale dovuta alla minore preparazione professionale degli operatori cinesi (la macchina CN in loco è inoltre stata da poco acquisita):



Fig.E.2 Z40E-F attrezzatura per l'alimentazione e per l'orientamento delle capsule



Fig.E.3 Z40E-F/Z48 attrezzatura per il dosaggio polvere

Fase 4. Calcolo della necessità di ore/macchina per la produzione aggiuntiva dei due gruppi ipotizzando 3 lotti di 15 pezzi ciascuno/anno

$$\frac{n^{\circ} \text{pezzi prodotti}}{\text{anno}} = \frac{n^{\circ} \text{pezzi prodotti/unità produttiva}}{\text{anno}} \times n^{\circ} \text{unità produttive}$$

$$\frac{\text{ore richieste/anno}}{\text{unità produttiva}} = T_{\text{set up}} \frac{n^{\circ} \text{lotti}}{\text{anno}} + T_{\text{lavorazione pezzo}} \frac{n^{\circ} \text{pezzi prodotti}}{\text{anno}}$$

Le potenziali ore di lavoro disponibili in un anno sono:

$$\frac{8 \text{ ore}}{\text{giorno}} \times \frac{21 \text{ giorni}}{\text{mese}} \times \frac{10 \text{ mesi}}{\text{anno}} = 1680 \cong 1700 \text{ ore/anno}$$

1700 è un coefficiente utilizzato in molte aziende meccaniche per calcolare le ore di lavoro anno dello stabilimento produttivo.

Pertanto per produrre i due gruppi presso la sede cinese le ore di lavoro richieste all'anno suddivise per unità produttive vengono riportate in tabella B.2:

UNITA' PRODUTTIVA	ORE
CENTRO DI LAVORO ORIZZONTALE	350
CENTRO DI LAVORO VERTICALE	303
FRESATURA TRADIZIONALE	165
TORNITURA C.N.	1.276
TORNITURA TRADIZIONALE	83
RETTIFICATRICE DIAMETRI	155
RETTIFICATRICE TANGENZIALE E LAPIDELLO	9
STOZZATRICE	21
AGGIUSTAGGIO	1.064

Tab.E.2 ore di lavoro/unità produttiva per produrre Z40E-F e Z40E-F/Z48

La nuova programmazione presso la sede cinese per soddisfare la produzione annuale è quindi rappresentata in tabella E.3.

	TURNI	POTENZIALI ORE DISPONIBILI	ORE TOTALI RICHIESTE	DIFFERENZA
CENTRO DI LAVORO ORIZZONTALE 1	3	5.100	6.925	-1.825
CENTRO DI LAVORO VERTICALE 4	3	20.400	18.953	1.447
FRESATURA TRADIZIONALE 1	2	3.400	4.070	-670
TORNITURA C.N. 3	2	10.200	9.666	534
TORNITURA TRADIZIONALE 1	2	3.400	4.603	-1.203
RETTIFICATRICE DIAMETRI 1	2	3.400	2.450	950
RETTIFICATRICE TANGENZIALE E LAPIDELLO 1	1	1.700	899	801
STOZZATRICE 1	1	1.700	1.136	564
AGGIUSTAGGIO 5	1	8.500	9.244	-744

Tab.E.3 ore di lavoro totali per le unità produttive cinesi comprendendo la produzione dei due nuovi gruppi. Le ore potenziali disponibili vengono calcolate utilizzando il coefficiente 1700 prima calcolato.

Si osserva un saldo negativo per il centro di lavoro orizzontale, la fresatura tradizionale e l'aggiustaggio.

Le possibili soluzioni sono:

- Forniture esterne
- Straordinario
- Acquisto di nuovo macchinario.

La terza soluzione viene scelta solo nei casi in cui il costo dell'investimento sia giustificato, cioè il fabbisogno di ore aggiuntivo sia equivalente alle 1700, il che significa che il nuovo macchinario lavorerebbe a pieno carico. In questo caso in realtà è superiore, però l'azienda preferisce evitare nuovi investimenti e pertanto è stata scelta a outsourcing e straordinari.

Fase 5. Si procede ora al calcolo dei costi dei componenti prodotti presso la sede cinese.

I risultati sono riportati in tabella B.4.

NUOVA analisi costi per singola macchina con nuovo KIT fornito dallo stabilimento cinese:	costo standard
KIT OPERCOLATRICE CINA	24.676,61
Z25/40F MATERIALE ELETTRICO SOLO STANDARD	5.214,30
Z25F/Z40F MATERIALE ELETTRICO PER POLVERE	44,61
Z25E-F/Z40E-F MATERIALE ELETTRICO 380V	335,53
Z25F/Z40F CORREDO MACCHINA STANDARD	217,62
Z25/40 E-F MATERIALE ELETTRICO BASAMENTO STD/UL	1.239,94
Z25E-F/Z40E-F PARTI AGGIUNTE SENZA IL GRUPPO PESO	127,35
Z25E-F/Z40E-F GRUPPO POMPA PER CREARE IL VUOTO	1.084,38
ZLAB 8/16 GRUPPO ASPIRATORE 50 HZ	717,23
BOCCHETTA ASPIRAZIONE SETTORE VASCA POLVERE	117,57
COSTO TOTALE (euro)	33.775,14

Tab. E.4 costi produzione macchina fabbricando i due gruppi analizzati presso lo stabilimento cinese

Fase 6. La tabella B.4 mostra una ulteriore riduzione dei costi del 5,4% rispetto alla attuale modalità di produzione e del 25,4% complessivo rispetto alla produzione dell'intera macchina in Italia. Pertanto è evidente la convenienza a produrre i gruppi in Cina.

Per implementare la produzione è necessario istruire i tecnici cinesi, cioè operare un trasferimento di tecnologia. Considerando che tutte le attrezzature di produzione necessarie sono già presenti presso lo stabilimento cinese, in realtà il T.T. deve avvenire in particolare in termini di addestramento degli operatori, infatti dall'analisi svolta risulta evidente quanto sia importante per questi nuovi gruppi la fase di aggiustaggio.

Considerazioni su T.T. e complessità:

Data l'evidente convenienza economica perché i due gruppi Z40E-F e Z40E-F/Z48 non sono stati fin'ora prodotti in Cina?

- La scelta di non produrre i 2 gruppi è dovuta alla loro *complessità tecnologica* che si manifesta in particolare in fase di assemblaggio richiedendo un numero di ore di lavoro elevato da parte di operatori esperti
- Le risorse umane e le competenze necessarie per la fabbricazione sono strettamente legate alla complessità tecnologica del prodotto
- Al fine di gestire la complessità occorre aumentare la preparazione degli operatori.
- Disporre di un indice di complessità tecnologica in casi come questo permetterebbe di scegliere quali componenti produrre in Italia e quali all'estero sulla base di un indicatore oggettivo e rigoroso, anziché su quella di considerazioni soggettive basate su conoscenza del prodotto ed esperienza pregressa dei responsabili di produzione.

E.2 VASTARREDO

Leader del mercato italiano degli arredi scolastici e azienda più grande del settore a livello europeo, Vastarredo ha sede a Vasto in Abruzzo, e ha operato un trasferimento di tecnologia nel 1994 acquisendo una ex-segheria in Polonia, la Refas, al fine di trasformarla in un proprio stabilimento produttivo. trasformandola in una realtà di successo in grado di soddisfare il fabbisogno della casa-madre di componenti in legno di faggio nonché di servire direttamente il mercato polacco.

Le principali strategie che il gruppo sta perseguendo attualmente prevedono la ridefinizione della struttura di vendita e l'incremento dell'efficienza di tutto il processo produttivo-logistico. E' stato aperto un ufficio commerciale a Mosca e l'Europa dell'Est è considerata un mercato potenziale di grande interesse per l'azienda. Nella figura sotto riportata alcuni dei principali prodotti dell'azienda.

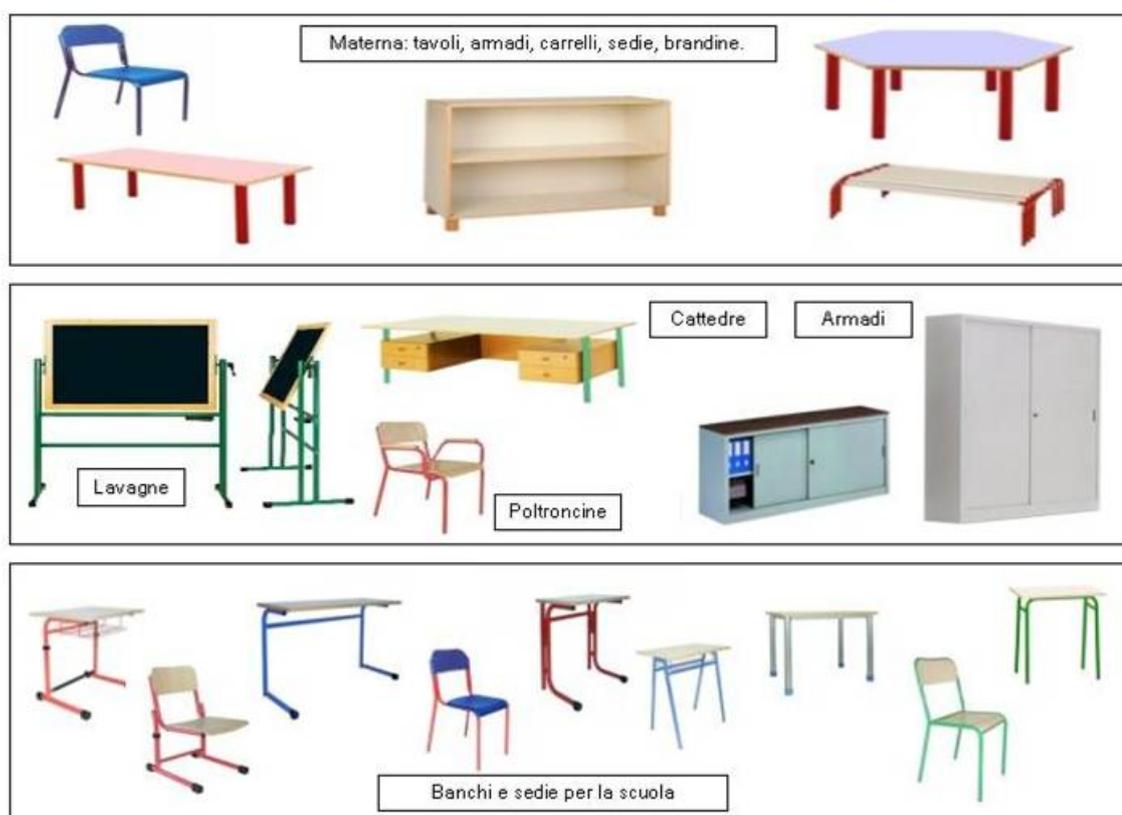


Fig.E.4 Principali prodotti della Vastarredo

I motivi che hanno portato al trasferimento di tecnologia in Polonia sono principalmente legati alla ricerca di materie prime e di nuovi mercati:

- Enorme patrimonio forestale
- Livello qualitativo del legname elevato
- Potenzialità di sviluppo del paese elevata
- Disponibilità di mano d'opera a costi vantaggiosi e con un'alta capacità di assorbimento tecnologico
- Posizione geografica strategica
- Distanza culturale Italia-Polonia non elevata.

L'azienda ha realizzato un'integrazione verticale della produzione localizzando ogni fase del processo produttivo in uno dei suoi stabilimenti in Italia (due) o in Polonia a seconda della convenienza, al fine di minimizzare i costi di produzione, in particolare rispetto al costo della materia prima (legname).

Nello stabilimento polacco Refas si producono invece tutti i componenti semilavorati in legno di faggio: curvati per sedili, spalliere, bordi per banchi o lavagne, ecc...(il processo produttivo di questo stabilimento verrà analizzato nei paragrafi successivi).

La casa-madre ha tenuto presso di sé alcune delle fasi critiche del processo produttivo:

- la progettazione CAD-CAM;
- la costruzione delle strutture tubolari in ferro per i prodotti;
- la verniciatura in polvere epossidica multicolore delle stesse;
- l'assemblaggio;
- il controllo finale.

Mentre nello stabilimento polacco Refas si producono tutti i componenti semilavorati in legno di faggio:

- sedili e schienali per le sedie
- bordi di finitura per banchi, cattedre e lavagne
- strutture tubolari in ferro per banchi e sedie.

Attualmente la produzione si aggira attorno a 1200 coppie di curvati (sedile + spalliera) al giorno per la produzione delle sedie utilizzando una quantità di sfogliato di faggio pari a 1200 mq. Per la produzione dei bordi destinati al processo di finitura di banchi e armadi sono destinati invece circa 5 mq di sfogliato al giorno.

Oggi il 20% circa della produzione è venduto sul mercato polacco a clienti locali o esteri, mentre il 70% è ancora destinato alla Vastarredo. Il restante 10% è invece venduto dalla Refas a concorrenti italiani della Vastarredo.

Il processo produttivo all'interno dello stabilimento di sedute e schienali è caratterizzato da 4 operazioni:

1. Taglio dei derulati in faggio
 2. Lavorazione di sedute e schienali
 3. Verniciatura
 4. Finissaggio
1. Il legno arriva in stabilimento sotto forma di tavole preformate provenienti dai Monti Tatri e in possesso di certificazione FSC che garantisce un ripopolamento della piantagione una volta

prelevata per scopi industriali. Le tavole vengono tagliate e ridotte nelle dimensioni volute passando attraverso una serie di macchine (sega multilama, sega a nastro, scorniciatrici, pialle a spessore, sezionatrici).

2. Viene quindi effettuata la lavorazione delle sedute e degli schienali attraverso sezionatrici per derulato; calibratrici per la levigatura; presse a caldo. I derulati così ottenuti vengono immersi in un bagno di colla vinilica e posizionati nelle presse formando un multistrato di spessore predefinito; l'azionamento della pressa provvede contemporaneamente a rendere compatto il multistrato e conferire al pezzo, mediante appositi stampi, una forma convessa. Le presse sono munite di caldaie interne con circolazione di acqua calda che raggiunge temperature di circa 90°C.

3. Il pezzo così ottenuto subisce un'operazione di essiccamento in un ambiente adatto mantenuto a 12°-13° di umidità per potere poi essere verniciato in un impianto di verniciatura ecologica (utilizzando vernici a base di acqua e con bassissimo livello di tossicità e inquinamento ambientale) che utilizza un ambiente in depressione permettendo una migliore presa della vernice sul pezzo.

4. Il semilavorato è infine pronto per la fase di finissaggio e collaudo (addetti in questa fase controllano che il pezzo non presenti imperfezioni e rispetti i requisiti di progetto fondamentali quali forma e dimensioni) e successivamente a quella di imballaggio e spedizione.

La strategia dell'azienda prevede di realizzare una integrazione orizzontale per alcuni prodotti destinati al mercato dell'Europa dell'Est che verranno prodotti interamente in Polonia. In particolare si pensa di trasferire alla Polonia l'intera produzione delle sedie, a tale scopo i macchinari da inserire per completare il processo produttivo sono:

- Robot di saldatura;
- Impianto di sgrossatura e lavaggio della struttura assemblata dal robot
- Impianto di verniciatura con polvere epossidica.

Il risparmio stimato dei costi di produzione con questa modalità sarà del 30% circa.

Considerazioni su T.T. e complessità:

La Vastarredo ha scelto una strategia di internazionalizzazione che ha comportato come primo passo la creazione di uno stabilimento produttivo in Polonia e il trasferimento di tecnologia verso tale stabilimento. La scelta dell'ubicazione dello stabilimento ha comportato un grande impegno per comprendere quale fosse il paese più adatto e per questo l'azienda si è avvalsa di società di consulenza e istituzioni pubbliche quali l'ICE.



Fig.E.5 Presse a caldo presso Refas Polonia che intervengono nella fase 2 del processo per la lavorazione di sedute e schienali.



Non è stato utilizzato nessun supporto e nessun modello di Technology Transfer, che sarebbero stati invece di notevole utilità in questa fase. Il modello dinamico di Jayaraman, M. Bhatti, H.Saber (2004) avrebbe potuto per esempio fornire importanti informazioni in merito al livello tecnologico del paese ricevente consentendo di orientarsi immediatamente verso la Polonia rispetto a paesi tecnologicamente molto arretrati inizialmente presi in considerazione, quali l'Albania, sui quali sono state spese risorse per effettuare studi di fattibilità.

L'altra considerazione che emerge è legata alla *complessità del prodotto*: anche in questo caso le fasi del processo considerate più difficili da realizzare quali la costruzione della struttura in ferro, la verniciatura secondo accorgimenti ecologici e l'assemblaggio sono state fino ad oggi svolte in Italia anche perché il vantaggio di una produzione locale si è identificato in particolare sulla costruzione dei derulati in legno data la presenza in loco di materia prima. In un'ipotesi di ulteriore espansione potrebbe essere significativo disporre di un indice di complessità tecnologica che possa fungere da supporto a queste considerazioni, in particolare nella scelta di componenti e prodotti da fabbricare presso altri stabilimenti.

ALLEGATO F Sistemi produttivi

Al fine di affrontare in modo efficace il tema della complessità applicata ad un sistema produttivo occorre richiamare alcune nozioni di base che verranno riprese nel corso del presente lavoro.

Si definisce sistema produttivo un sistema in cui, a partire da risorse che definiamo *input*, quali materiali, energia, manodopera e mezzi finanziari, otteniamo degli *output* che sono i prodotti.

Esistono cinque tipologie principali di produzione che caratterizzano i sistemi produttivi, ovvero:

- **Produzione per lotti (*job shop*):** in questa tipologia di sistema produttivo la fabbricazione avviene per quantitativi di prodotti identici, chiamati lotti. Su tutti i prodotti del lotto vengono effettuate le medesime lavorazioni, ogni prodotto subisce lo stesso processo. I lotti possono essere unici o ripetibili nel tempo. Le macchine utilizzate sono abbastanza flessibili e a volte questa tipologia converge nella *Group Technology*. Ogni volta che viene impartito l'ordine di produzione bisogna eseguire l'operazione di set-up, che consiste nell'impostare le macchine per la produzione di un determinato lotto, avendo considerato flessibilità nei macchinari (General Purpose).
- **Produzione per processo:** in questo caso la produzione avviene in reparti caratterizzati da lavorazioni omogenee, si hanno molti prodotti in quantità limitata per ogni tipo, anche se la produzione totale può essere elevata. C'è un alto costo del flusso del materiale, i macchinari utilizzati spesso devono assolvere a più di una funzione e sono macchine speciali (Special Purpose).
- **Produzione a punto fisso:** questa modalità viene adottata per prodotti molto grandi e complessi, per esempio aerei. Il prodotto non viene movimentato ma rimane fermo e sono gli operai che portano i componenti o le attrezzature necessarie per le lavorazioni. E' caratterizzata da grande flessibilità e consente di cambiare le caratteristiche di prodotto in corso. Il volume di produzione ovviamente è molto basso, spesso unitario.
- **Produzione di massa (*quantity production o flow production*):** si divide in produzione a quantità e produzione a flusso. La produzione a quantità è caratteristica di settori industriali come quello chimico o per la produzione della carta. Si hanno altissimi volumi di produzione. La produzione a flusso invece rappresenta la fabbricazione specializzata di prodotti identici in quantità molto elevate, con la presenza di macchine completamente dedicate a quel tipo di

produzione (Special Purpose); sono quindi investimenti idiosincratici, cioè che non possono essere convertiti ad altre produzioni, anche se negli ultimi tempi si stanno diffondendo macchine speciali che possono essere riconfigurabili. L'investimento da effettuare per gli impianti di questo tipo è alto.

Altro tipo di differenziazione può essere fatta tra:

- **Produzione su catalogo o di serie:** l'azienda fabbrica prodotti che pone in un catalogo (campionario) decidendo autonomamente le caratteristiche e in attesa degli ordini dei clienti
- **Produzione su commessa:** il prodotto viene progettato e fabbricato su necessità e specifiche del cliente, si distingue tra:
 - prodotti differenziati: progettati ex-novo
 - prodotti caratterizzati: possiedono circa le stesse caratteristiche pur essendo di volta in volta differenti secondo le esigenze del cliente (varianti importanti di catalogo).

1.	Single machine	forma basica del sistema manifatturiero
2.	Manufacturing cell	Raggruppa diverse macchine che producono una famiglia di componenti con caratteristiche simili (Group Technology). Metodo più efficiente per la produzione a lotti
3.	Flow line	Serie di macchine costituiscono una linea. Adatta per alti volumi di produzione.
4.	Factory	Stabilimento produttivo costituito da una combinazione dei livelli precedenti integrati da funzioni e software .
5.	Production network	Grazie a Internet e alla globalizzazione la produzione viene realizzata in diversi stabilimenti produttivi di una rete collegati da catene di fornitura.

Tab.F.1 Classificazione gerarchica dei sistemi produttivi

I sistemi produttivi possono essere classificati su cinque livelli [9] come rappresentati in tabella F.1:

- ***sistema a macchina singola***

Un sistema a macchina singola, o a singola stazione di lavoro, oltre ad essere il più semplice è il modulo fondamentale dei sistemi manifatturieri, partendo da una generica macchina infatti si possono avere sistemi più o meno complessi. La macchina stessa, con le sue modalità di funzionamento, le interfacce uomo macchina, la tipologia, può implicare una maggiore o minore complessità di gestione valutabile o meno secondo le esigenze e l'accuratezza delle stime fatte.

- ***sistema a cella singola o FMS***

Ogni singolo componente del prodotto passa per più macchine fino ad uscire nella forma richiesta. Dagli anni '60 l'esigenza della produzione in limitate quantità ma numerose varietà di prodotti ha portato allo sviluppo della Group Technology, disponendo più macchine per formare celle di fabbricazione di famiglie di componenti creati con principi di similarità.

- ***linea di produzione***

Il sistema di produzione in linea, idealizzato agli inizi del secolo da Henry Ford e tutt'oggi valido in presenza di alti volumi di produzione e per prodotti di largo consumo e bassa complessità, è la scelta migliore se minimizzare i tempi di ciclo è l'obiettivo principale. In questo caso diventano fondamentali elementi tipici del Just in Time ideato dalla Toyota quali il bilanciamento della linea, il controllo dei flussi di materiale in push (ordine che parte dalla produzione per l'ottimizzazione delle risorse) o pull (ordine che parte dal cliente per la sua maggiore soddisfazione).

- ***fabbrica***

Il controllo dei flussi nel sistema manifatturiero basato sull'MRP (Material Requirement Planning) inizialmente limitato alla mera produzione del prodotto si allarga, grazie all'utilizzo di maggiori capacità di calcolo e di software e strumenti sempre più potenti, a tutto il processo produttivo includendo la progettazione, la pianificazione del processo stesso, l'emissione di ordini fino alla distribuzione, con l'obiettivo di trovare un ottimo globale del sistema invece dell'ottimo locale.

Peklenik descrive una fabbrica o sistema manifatturiero tramite il modello cibernetico mostrato in figura: “proponendo le basilari entità richieste per la produzione avremo una serie di input $\{X\}$ e di output $\{Y\}$, i prodotti sono definiti come un insieme di oggetti $\{Z^*\}$ specificati dal soggetto (il management dell'impresa). Il soggetto controlla l'oggetto (il sistema manifatturiero) tramite una serie controlli $\{U\}$, contemporaneamente valutando gli input $\{X\}$ e gli output $\{Y\}$ tramite misurazioni o stime delle informazioni dell' x -esimo input I_x o de y -esimo output I_y . Le

decisioni prese dal soggetto riguardo gli input {X} e riguardo il controllo di una serie di obiettivi {Z*}, richiedono l'attività del soggetto dandogli il ruolo predominante nel controllo dell'oggetto”.

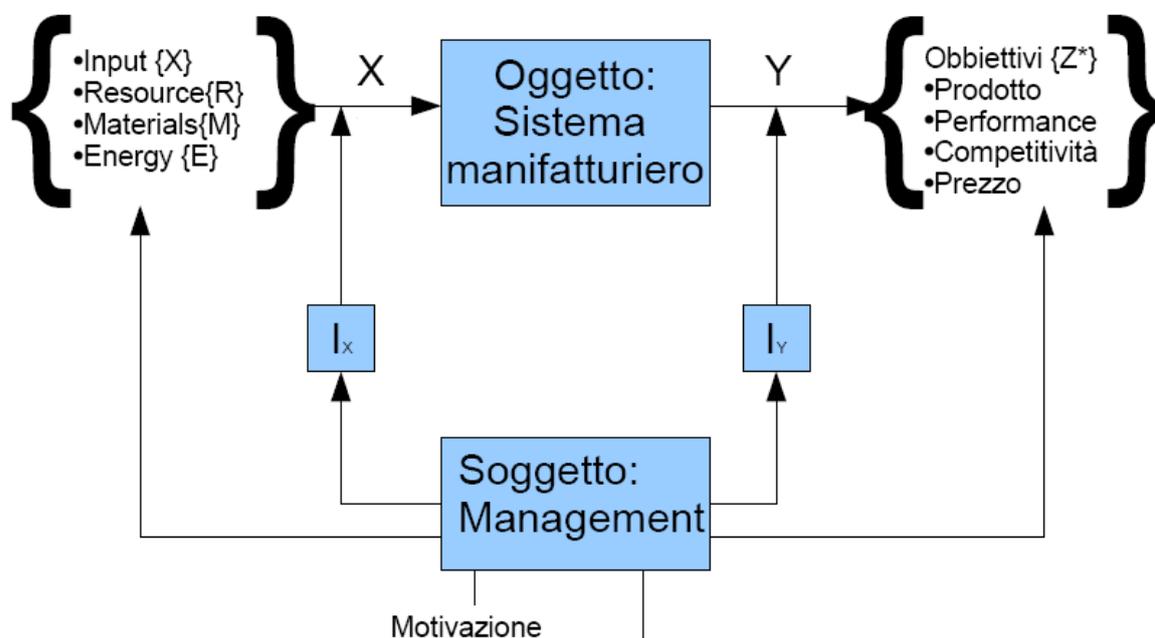


Fig.F.1 modello cibernetico di sistema produttivo proposto da Peklenik [9].

- **rete di produzione**

L'evoluzione dei sistemi di telecomunicazioni, informatici e di trasporto, la comparsa di Internet e di altri strumenti che favoriscono il dialogo fra azienda ed esterno hanno reso sempre meno definiti i confini aziendali rendendo il processo produttivo protagonista e filo conduttore del sistema manifatturiero. L'evoluzione o il livello gerarchico che comprende tutti i precedenti sistemi è quello della rete di produzione. Il modello di rete attualmente più diffuso riconosce il ruolo fondamentale della catena di produzione all'interno del processo: l'idea di un'integrazione verticale per produrre tutti o la maggior parte dei pezzi di un prodotto all'interno dello stabilimento viene sostituita dal concetto di rete di produzione, dove gli attori, siano essi la fabbrica stessa, collaboratori stretti o semplici fornitori, sono legati fra loro da catene di fornitura dove ognuno dei nodi possiede core competence di produzione.

ALLEGATO G Tecnica Likert e fattore Alpha di Cronbach

G.1 Tecnica Likert

La tecnica di Likert (1932) fu proposta dall'autore per la misura dell'atteggiamento [157]. La tecnica è relativamente semplice e viene applicata al fine di consentire all'intervistato di esprimere un giudizio:

- a) si mette a punto un certo numero di item che esprimono un atteggiamento favorevole e contrario ad un certo oggetto
- b) a fianco ad ognuno si presenta una scala bipolare di accordo-disaccordo (in genere si usano scale pentenarie o settenarie); talvolta si usano scale a sei punti, senza punto centrale
- c) si chiede ai soggetti di indicare su questa il grado di accordo o disaccordo con quanto espresso dall'item.

Per l'attribuzione dei punteggi (*scoring*), Likert propose un metodo, da lui chiamato "metodo semplice" che è diventato il metodo standard per la codifica dei giudizi espressi su scale di questo tipo: si assegnano i punteggi numerici 1,2,3 (se la scala è settenaria) alle risposte "sono molto in disaccordo", "sono in disaccordo" "sono un po' in disaccordo" e i punteggi 5,6,7 alle risposte "sono un po' d'accordo", "sono d'accordo" e "sono molto d'accordo" se l'item è favorevole (viceversa se l'item è sfavorevole); alla categoria intermedia, se prevista, si assegna il punteggio 4. Se la scala è pentenaria si usano punteggi da 1 a 5. Un punteggio elevato corrisponde allora a un atteggiamento favorevole verso l'oggetto.

La preparazione di una scala di atteggiamento secondo il metodo di Likert inizia con la *raccolta di un numero piuttosto elevato di frasi* riguardanti il tema in questione. Fonti: interviste non strutturate, libri, giornali, la letteratura, altre ricerche sull'argomento.

Nella stesura di queste frasi è bene seguire alcuni criteri:

- formulare gli item in modo che persone con atteggiamento opposto o diverso grado di favore-sfavore, diano risposte diverse
- evitare le affermazioni che esprimono atteggiamenti troppo estremi in quanto queste possono essere accettate o rifiutate da tutti
- gli item devono essere concisi ed espressi con un linguaggio semplice evitando termini tecnici
- evitare le frasi con forme sintattiche complesse (ad esempio, la doppia negazione)
- formulare gli item in modo che esprimano per metà un atteggiamento favorevole e per metà un atteggiamento sfavorevole (ciò allo scopo di evitare fenomeni di *response set*: cioè la

tendenza a dare risposte stereotipate, preferendo sempre le modalità di destra o di sinistra della scala di risposta indipendentemente dal contenuto dell'item).

Dopo una prima somministrazione della scala a un buon numero di soggetti si procede a selezionare gli item più adeguati che andranno a costituire la scala definitiva. Tale selezione si fonda sulle *tecniche di analisi degli item*.

Esempio di scala *settenaria*:

1. estremamente in disaccordo
2. abbastanza in disaccordo
3. un po' in disaccordo
4. né in accordo né in disaccordo
5. un po' d'accordo
6. abbastanza d'accordo
7. estremamente d'accordo

G.2 Fattore Alpha di Cronbach

Un coefficiente che sintetizza l'attendibilità di un test che richiede risposte soggettive è l'alpha di Cronbach, introdotto nel 1951 [158]. Tale coefficiente descrive la coerenza interna di raggruppamenti di items; in generale, nello studio di un questionario di atteggiamenti, elevati valori di Alpha indicano che i soggetti esaminati esprimono un atteggiamento coerente riguardo a ciascun item appartenente a ciascuna dimensione. La verifica della coerenza interna di ogni subtest permette non solo di approfondire lo studio e la definizione della struttura fattoriale, ma anche di conoscere e definire la validità di costruito della scala. In questo senso i ricercatori, nell'applicabilità alle scale Likert di questa tecnica, sono concordi nell'adottare il valore di Alpha = 0,6 come riferimento di un livello appena accettabile di coerenza interna e di adeguatezza di costruito del test costruito e un valore di Alpha = 0,7 come valore minimo auspicabile per potere considerare il test valido [159].

Il fattore Alpha dipende dalla varianza, cioè dalla deviazione standard e quantifica pertanto quanto in media le risposte si discostano dalla risposta più comune, consentendo quindi di comprendere l'attendibilità dei risultati del questionario [160].

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \frac{(\sigma_T^2 - \sum_{i=1}^k \sigma_i^2)}{\sigma_T^2}$$

dove:

X la matrice delle risposte al questionario in cui ogni riga rappresenta un argomento e ogni colonna una domanda

con n numero di righe

con k numero di colonne

σ^2_i è la varianza di ogni colonna di X

σ^2_T è la varianza della somma delle righe di X

con:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2$$

dove:

μ media aritmetica dei valori x_i

σ deviazione standard

G.3 Metodo Delphi

Il nome del metodo si deve al famoso oracolo greco di Delphi ed è stato sviluppato nei primi anni '50 negli Stati Uniti presso la Rand Corporation su commissione della U.S. Force che voleva individuare come selezionare l'opinione più generale più affidabile di un gruppo di esperti su tematiche militari. Nel 1964 Gordon ed Helmer produssero un rapporto dove veniva descritto il metodo Delphi.

Si tratta di una tecnica usata per ottenere risposte ad un problema da parte di un gruppo (panel) di esperti che indipendentemente gli uni dagli altri forniscono risposte ad un questionario. Dopo ogni giro di risposte un facilitator dell'indagine fornisce un anonimo sommario delle risposte degli esperti e le loro ragioni in modo che ciascuno possa rivedere le proprie risposte. Ad ogni giro di risposte pertanto alcuni esperti possono fornire nuove versioni della proprie fino ad arrivare ad una sufficiente convergenza su risposte comuni. Il facilitator può quindi scegliere le risposte finali con una sorta di media matematica.

Fasi di realizzazione della tecnica Delphi:

1. Formazione di un team di Delphi per intraprendere e controllare il progetto

2. Selezione di uno o più pannelli da coinvolgere nell'esercitazione. Abitualmente i partecipanti sono esperti della materia di ricerca
3. Sviluppo del primo round dei questionari di Delphi
4. Esame del questionario
5. Trasmissione dei primi questionari ai partecipanti
6. Analisi delle risposte del primo round
7. Preparazione del secondo round di questionari
8. Trasmissione del secondo round di questionari ai partecipanti
9. Analisi del secondo round di risposte (i punti da 7 a 9 sono ripetuti finché non viene raggiunta una stabilità nei risultati)
10. Preparazione di un rapporto da parte del team di analisi per presentare le conclusioni dell'esercitazione.

ALLEGATO H Entropia e teorema di Shannon

L'entropia è un concetto che deriva dalla termodinamica introdotto da Rudolf Clausius nel 1867 [161], che la definì come una funzione di stato che indica dove va a finire l'energia fornita ad un sistema, con riferimento al legame tra movimento interno ed energia interna o calore e misura pertanto del disordine del sistema.

L'entropia viene utilizzata ai fini di misurare la complessità, in quanto misura della incertezza e difficoltà di gestione di un sistema.

H.1 Teoria della comunicazione di Claude Shannon (1948)

La teoria di Shannon [162] sostiene che l'entropia misuri la quantità di incertezza o informazione presente in un segnale aleatorio.

Per informazione si intende il numero di bit di cui è composto un segnale, una sorgente casuale d'informazione non può essere rappresentata pertanto con un numero di bit inferiore alla sua entropia.

L'informazione nel codice binario (0 circuito chiuso, 1 circuito aperto) viene definita come il logaritmo in base 2 del numero di possibili alternative corrispondenti ai possibili segnali.

Ex. 3 relé $\rightarrow 2^3 = 8$ alternative $\rightarrow \log_2 8 = 3$ unità di informazione

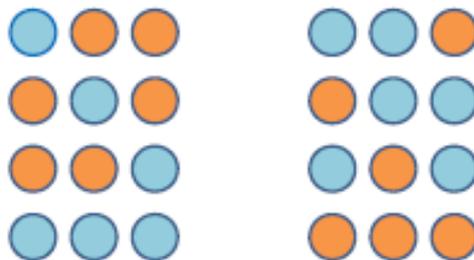


Fig.H.1 Rappresentazione grafica di tutte le possibili combinazioni di 3 relé

La sorgente emette in base a certe probabilità una sequenza di segnali che formano il messaggio – in base a un processo detto stocastico. Ogni sequenza ha una certa probabilità di occorrere anche in relazione agli eventi precedenti - processo (stocastico) markoviano.

La funzione che rappresenta meglio il fenomeno è l'entropia.

Infatti l'entropia misura la tendenza del sistema fisico a divenire sempre più caotico quindi l'informazione è misurata dall'entropia, dato che è in rapporto con l'ammontare di libertà di scelta che si ha nel costruire un messaggio.

$$H = -[p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + \dots + p_n \log_2 p_n]$$

$$H = -p_i \log_2 p_i$$

in cui

H quantità di informazione totale trasmessa dal sistema di comunicazione.

p_i probabilità con cui è emesso il segnale

$$0 < p_i < 1$$

Proprietà di H:

- H è continua in p_i
- H è massima quando gli stati del sistema sono equiprobabili $p_i = 1/n$
- H è zero quando c'è certezza assoluta $p_i = 1$
- H rappresenta quindi la complessità del sistema

Il fatto che l'entropia di un sistema rappresenta la quantità di informazione richiesta per descriverne lo stato insieme alle proprietà che ha come funzione, la rendono equivalente alla complessità del sistema stesso. Maggiore è il numero degli stati che il sistema può assumere e più verosimilmente questi stati tendono ad occorrere con la stessa probabilità, più elevata quindi è la complessità del sistema

L'entropia si riferisce ad un sistema produttivo con:

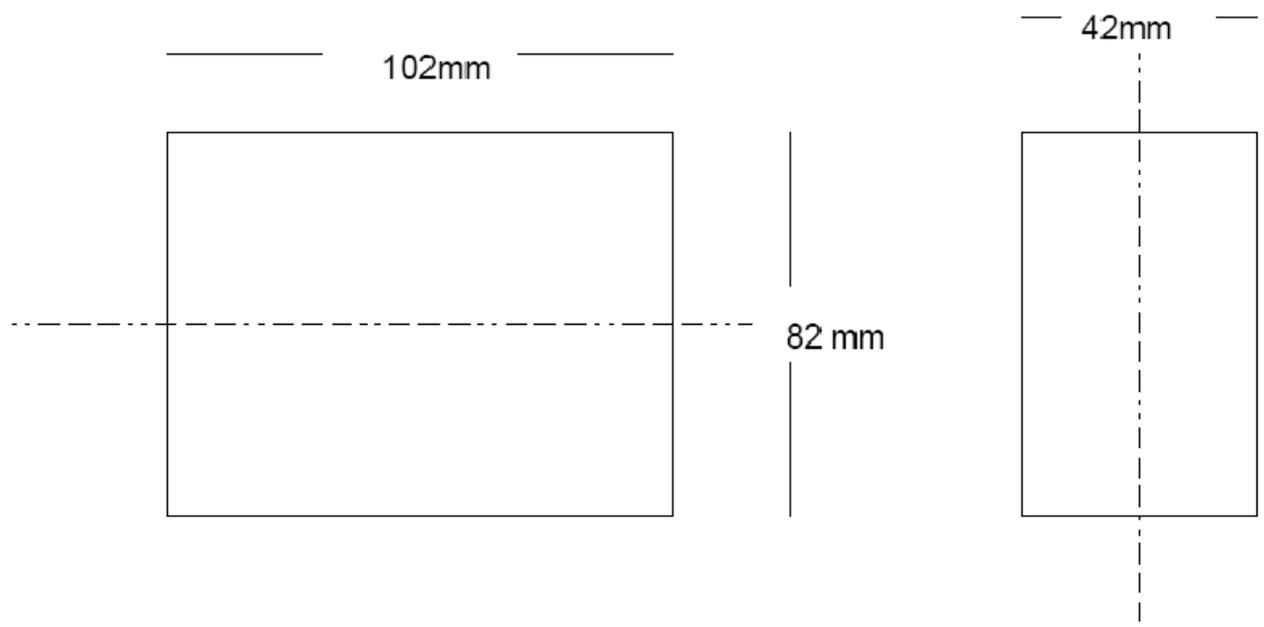
- n stati del sistema = configurazioni (layout, macchinari, tecnologie ecc.)
- p_i probabilità del sistema di trovarsi nello stato i

ALLEGATO I Esempio applicazione metodologia dei Prof. ElMaraghy, Urbanic di calcolo dell'indice di complessità di prodotto

Con riferimento alla metodologia ibrida introdotta dal Prof. H.A. ElMaraghy [110], si riporta il calcolo di un indice di complessità per un semplice componente.

Consideriamo un semplice pezzo fresato, al fine di comprendere meglio l'applicazione della metodologia.

Grezzo di partenza:

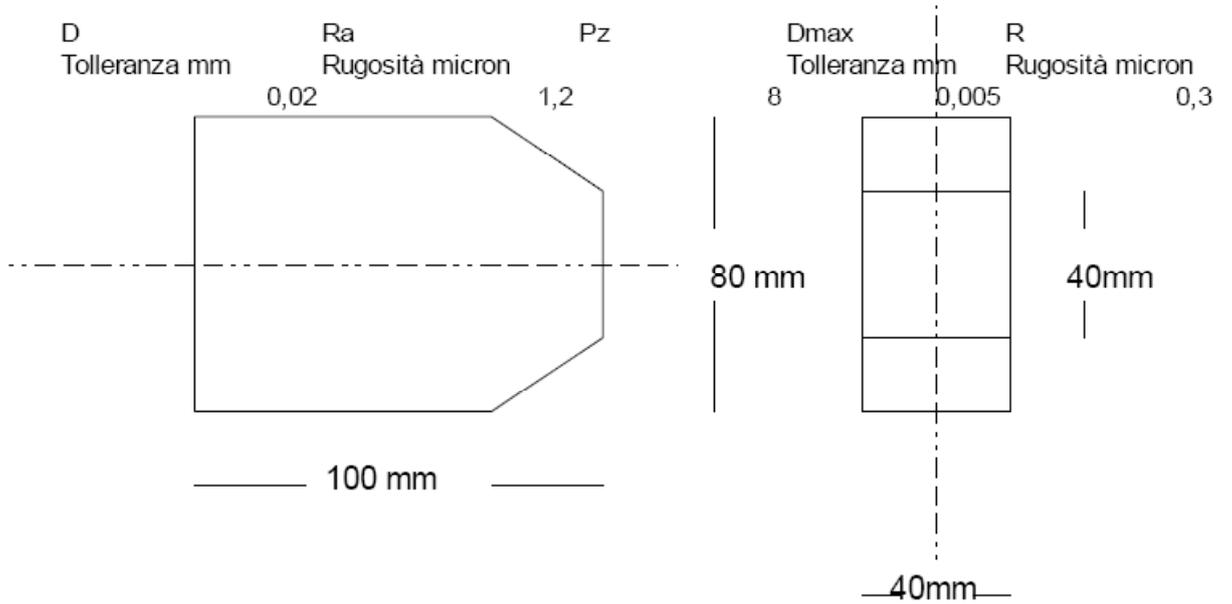


Materiale: acciaio C30 (indice di lavorabilità $M=17$), rugosità massima accettabile sulle superfici di 1,2 (il pezzo non ha necessità di essere lavorato con una mola) e di 0,3 nelle pareti del foro, tolleranza dimensionale di $\pm 0,02$ mm su ogni lato e per il foro H7, superfici planari accettabili al max dentro la distanza tra due piani immaginari paralleli pari a 0,01 mm.

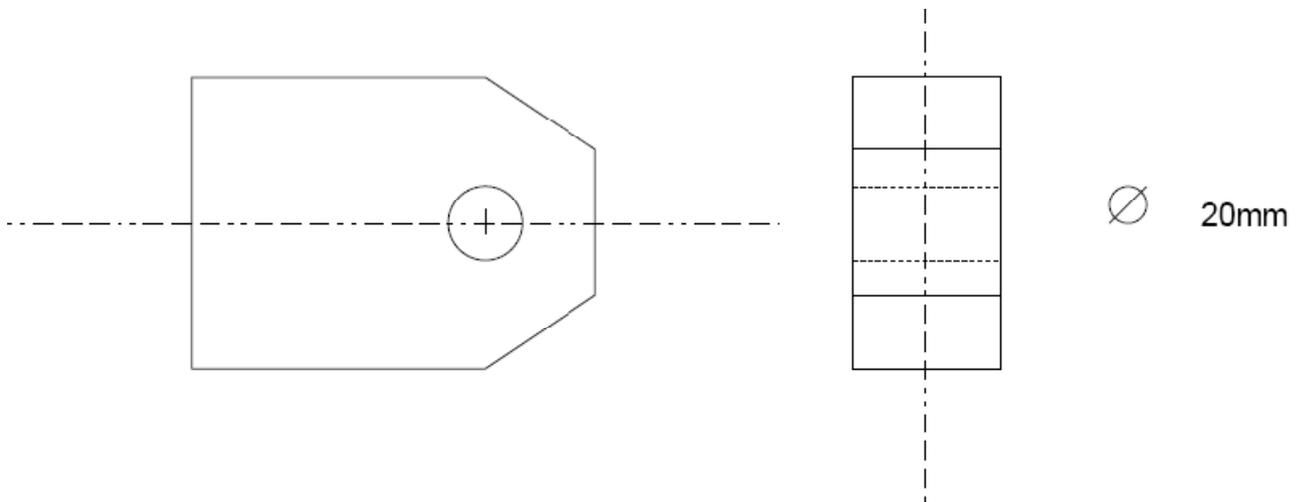
- | | |
|---|--------|
| 1. Tolleranza dimensioni $=\pm 0,02$ mm | tipo a |
| 2. Tolleranza foro = H7 | tipo a |
| 3. Tolleranza planarità = 0,01 mm | tipo b |
| 4. Rugosità = 0,3 μm | tipo c |

5. Rugosità massima = 1,2 μm

tipo c



Viene eseguito un foro nel pezzo di diametro 20 mm:



Consideriamo un ciclo di lavorazione composto da 8 operazioni di fresatura (che corrispondono a 8 superfici) con fresa di 125 mm e 14 denti e 1 di foratura con una punta di 20 mm.

Il numero totale di feature è 9, pari a 8 superfici + 1 foro.

Al fine del calcolo di $D_r = \frac{n}{N}$

	N Numero di informazioni	n tipi di informazioni
Angoli (tra superfici)	18	1
Centri	1	1
Dimensioni (lati, spessori)	7	1
Tolleranze (superfici fresate e forata)	3	2 (a e b)
Diametri	1	1
Rugosità (superfici fresate e forata)	2	1
totali	32	7

$$D_r = \frac{7}{32} = 0,218$$

$$H_{product} = \log_2(N + 1) = \log_2 33 = 5,05$$

Vengono attribuiti dagli operatori di produzione i valori 0-0,5-1 ai diversi aspetti delle feature del prodotto, valutando lo sforzo nel fabbricare i diversi aspetti della feature anche in funzione della facilità di lavorazione del materiale:

J = 3 categorie	Aspetti				
		Factor_level _J			F _{CF}
<i>feature</i>	numero	forma	posizionamento	tolleranze	somma factor_level/J
superfici fresate	8	0	0	0,5	0,17
foro	1	0	0,5	1	0,5

Vengono attribuiti dagli operatori di produzione i valori 0-0,5-1 alle diverse specifiche del prodotto, valutando lo sforzo nel rispettarle durante la fabbricazione della feature:

K = 2 specifiche	Specifiche		
		Factor_level _K	S _{CF}

<i>feature</i>	numero	rugosità	no bordi acuti e bave	somma factor_level/K
superfici fresate	8	0,5	0,5	0,5
foro	1	1	0,5	0,75

Applicando le formule:

$$F_{CF} = \frac{\sum_{j=1}^J factor_level_j}{J}$$

$$C_{f,feature} = \frac{F_N * F_{CF} + S_N * S_{CF}}{F_N + S_N}$$

F_N è il numero delle feature, per le superfici è 8, per il foro è 1

S_N è il numero dei controlli di specifica, per le superfici visto che sono 8 si esegue 1 controllo per superficie e quindi sono 8 controlli, per il foro è 1. Il controllo sulla feature implica la verifica di diverse specifiche.

$$C_{j,product} = \sum_{f=1}^F x_f * C_{f,feature}$$

si ottengono le complessità di caratteristica e i relativi coefficienti di complessità:

	Feature complexity $C_{f,feature}$	x_f	Weighted feature complexity
superfici fresate	$\frac{8*0,17+8*0,5}{8+8}=0,335$	$\frac{8}{9} = 0,88$	$0,88*0,335=0,2948$
foro	$\frac{1*0,5+1*0,75}{1+1}=0,625$	$\frac{1}{9} = 0,11$	$0,11*0,625=0,0688$
	$C_{j,product}$		0,3636

che introdotti nella formula:

$$CI_{product} = (D_{R_{product}} + C_{j,product}) H_{product}$$

consentono di ottenere l'indice di complessità di prodotto.

$$CI_{product} = \left(\frac{7}{32} + 0,3636 \right) 5,05 = 2,94$$

Se non ci fosse il foro:

	N Numero di informazioni	n tipi di informazioni
Angoli (tra superfici)	18	1
Dimensioni (lati, spessori)	7	1
Tolleranze (superfici fresate)	2	2 (a e b)
Rugosità (superfici fresate)	1	1
totali	28	5

$$D_r = \frac{5}{28}$$

$$H_{product} = \log_2(N + 1) = \log_2 29 = 4,86$$

$$CI_{product} = \left(\frac{5}{28} + 0,2948 \right) 4,86 = 2,3$$

nel caso del pezzo non forato l'indice di complessità è ovviamente più basso.

ALLEGATO L Considerazioni sulla complessità di processo primario

Tutte le considerazioni svolte nel presente lavoro si riferiscono a processi tecnologici cosiddetti secondari, cioè che conferiscono al prodotto la sua forma definitiva. Quasi sempre, se si tratta di pezzi meccanici quali quelli della verifica sperimentale, si tratta di lavorazioni per asportazione di truciolo. Questo in quanto l'azienda alla quale può essere utile la conoscenza dell'indice di complessità tecnologica in genere si limita a comprare un grezzo di partenza sul quale effettuare le lavorazioni che lo trasformano in prodotto finito.

In realtà però il pezzo prima di subire il processo secondario subisce un processo primario e quindi è utile soffermarsi anche su possibili indicatori di complessità tecnologica in tale fase, che potranno essere combinati con quelli relativi ai processi secondari. In particolare le aziende, come per esempio Ferrari, che in un'ottica di verticalizzazione realizzano internamente il prodotto a partire dalla materia prima, può essere interessante misurare la complessità di tutti i processi che il prodotto subisce.

A tale proposito esistono per i processi più comuni quali estrusione e fusione, con i quali si ricavano la maggior parte dei grezzi di partenza, dei fattori di forma che quantificano la difficoltà con la quale viene ottenuto il pezzo e pertanto possono essere considerati rappresentativi e proporzionali alla sua complessità.

L.1 Fattori di forma per estrusione e fusione

I fattori di forma a disposizione in letteratura sono rappresentativi della complessità geometrica e di forma di un pezzo e si riferiscono ai processi di estrusione e fusione.

L'*estrusione* è il più flessibile tra i processi per deformazione plastica permettendo di produrre semilavorati in barre di sezione costante caratterizzati da una moltitudine di forme diverse. Esistono due modalità di esecuzione dell'estrusione: l'estrusione diretta e l'estrusione inversa. A seconda di come viene applicata la forza rispetto al verso di scorrimento del materiale che passa attraverso una matrice che gli conferisce la forma.

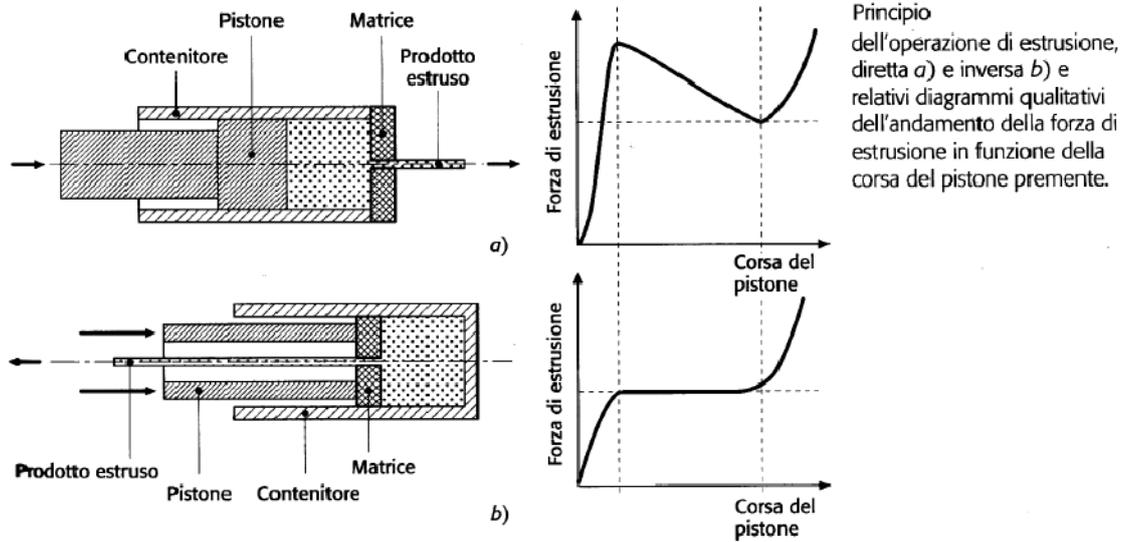


Fig.L.1 Forme per il processo e andamenti della forza di estrusione nel caso di estrusione diretta e inversa [163].

Nel processo di estrusione è difficile conoscere con precisione i valori istantanei della pressione del flusso perché essa è funzione dell'energia ceduta al metallo, delle temperature istantanee (dovute non solo al preriscaldamento della billetta ed alla temperatura del contenitore, ma anche al calore generato dall'attrito tra billetta e superfici del contenitore e della matrice al momento della deformazione) pertanto occorre ricorrere ad un fattore di forma che correla tale pressione alla velocità di movimento del metallo e alla temperatura ed alla forza della pressa, per prevedere i valori della pressione [163] di *Qamar, Arif e Sheikh*.

I fattori di forma di estrusione sono stati ideati allo scopo di valutare il processo di estrusione e prevedere le performance del processo stesso, ma è evidente che funzionano anche come indicatori della complessità del pezzo estruso.

Di seguito vengono riportati tutti i fattori di forma per pezzi estrusi presenti in letteratura:

- $C_1 = \frac{\text{perimetro sezione}}{\text{area sezione}}$
- $C_2 = \frac{\text{perimetro sezione}}{\text{peso in Kg}}$

- $C_3 = \frac{\text{perimetro CCD}}{\text{perimetro sezione circolare di pari area}}$
- $C_4 = \frac{\text{diametro CCD}}{\text{minimo spessore parete}}$
- $C_5 = 0,98 + 0,02 \times \left(\frac{\text{perimetro sezione}}{\text{perimetro sezione circolare di pari area}} \right)^{2,25}$
- $C_6 = 0,95 + 0,05 \times \left(\frac{\text{perimetro sezione}}{\text{perimetro sezione circolare di pari area}} \right)^{1,5}$
- $C_7 = \frac{10 \times \text{area sezione}}{\text{diametro CCD} \times \ln(\text{area sezione}) \times \sqrt{U_e + a \times U_i}}$

dove in C_7 U_e è il perimetro esterno per le sezioni cave, U_i è il perimetro interno per le sezioni cave e semicave, mentre a è un fattore che esprime la difficoltà tipica delle sezioni cave e semicave: per le sezioni cave $a = 2$, mentre per le sezioni semicave con aperture $a = (c / b_{\min})$, dove b_{\min} è la larghezza minima dell'apertura e c è la lunghezza massima, tra quelle longitudinali e trasversali, dell'interno cavo.

Infatti, come ben visibile da quest'ultimo fattore, c'è differente complessità nel realizzare estrusi pieni, semicavi e cavi: la complessità aumenta in modo crescente passando da pezzi pieni a semicavi ed infine a cavi.

Inoltre, il CCD è il Circumscribing Circle Diameter, ossia il diametro della più piccola circonferenza in grado di contenere la sezione in esame al suo interno.

Infine per i fattori di forma C_5 e C_6 , i valori numerici sono stati trovati sperimentando formule empiriche che hanno portato all'utilizzo di tali valori ottimali nel calcolo delle pressioni istantanee di cui si parlava precedentemente.

I fattori di forma C_1 , C_2 , C_4 , C_5 e C_6 sono stati presi dall'articolo sopra citato, mentre i fattori di forma C_3 e C_7 sono stati presi dal testo [164] di *Laue e Stenger*.

Il fattore di forma C_7 è inversamente proporzionale alla complessità, mentre tutti gli altri sono direttamente proporzionali alla complessità.

Per quanto riguarda il processo di *fusion*e, in letteratura si riporta un solo fattore di forma che può essere considerato proporzionale alla complessità.

Il processo fusorio è tecnologicamente più complesso rispetto all'estrusione, perché per rendere possibile la fusione occorre portare il materiale a temperature elevatissime e quindi bisogna progettare le attrezzature con modalità e materiali capaci di sopportare tali temperature. Esistono varie tipologie e varie tecniche di fusione a seconda che le cavità matrici del getto e si ottengano da modelli permanenti (realizzati in legno o metallo) o perduti (realizzati in cera o in polistirene espanso) come indicato in fig.L.2.

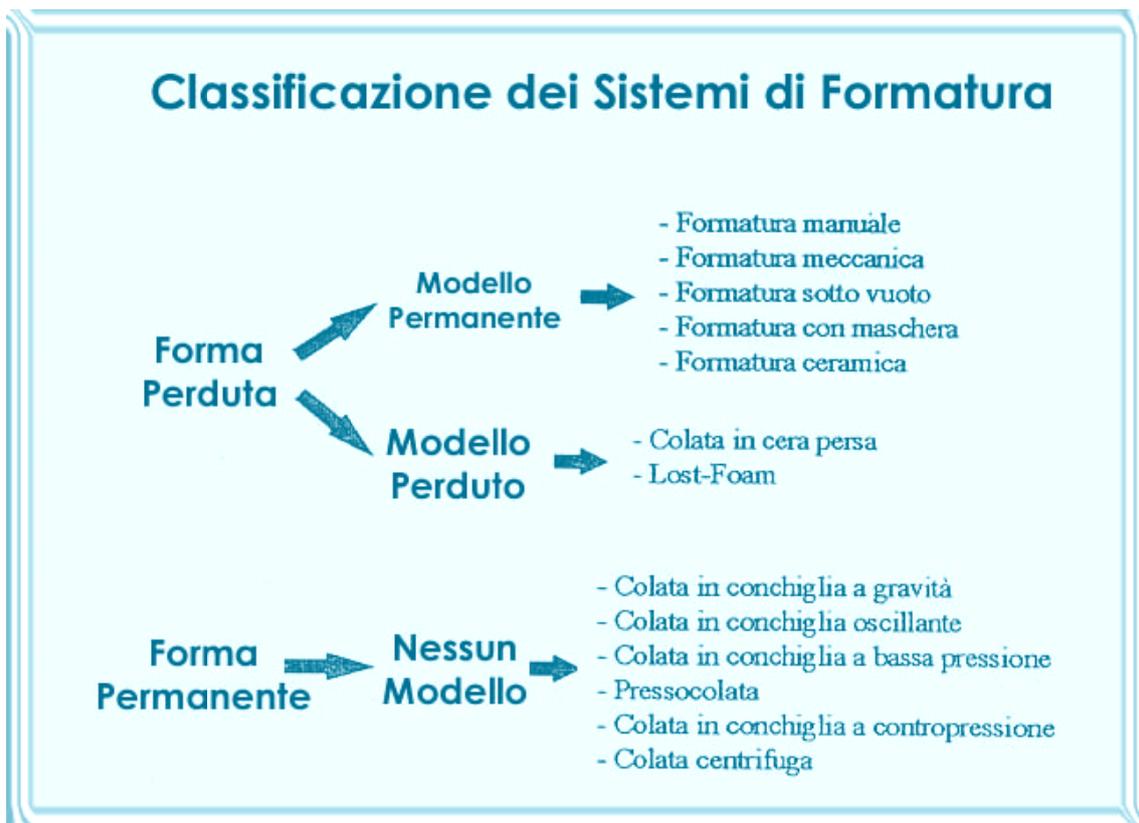


Fig.L.2 Classificazione dei principali processi primari [165]

Nella progettazione dei processi fusori, il fattore di forma gioca un ruolo fondamentale nella progettazione delle attrezzature di processo, in particolare riguardo alla localizzazione degli attacchi di colata. [165] di *Padhy, Sharan e Dwivedi*.

Infatti, le features del pezzo (in particolare features a forma di cilindro, cilindro cavo, solido rettangolare, cubo, semisfera, filetto e sezione ad L) vengono realizzate a partire da pezzi ottenuti da colata in forma di blocchi a cui è stato sottratto il materiale corrispondente alla feature. Viene definito un fattore di complessità di forma λ dato dal rapporto tra il volume della colata e l'area della superficie esposta, ossia:

$$C_8 = \lambda = \frac{\text{volume della colata}}{\text{area della superficie esposta}}$$

dove C_8 sta a significare che questo è comunque un fattore di forma proporzionale alla complessità ed in particolare è inversamente proporzionale, perché a parità di volume della colata maggiore è l'area della superficie esposta (e quindi maggiore è il numero di features e più complesse sono le forme di tali features) minore è il valore del fattore di forma: quindi più è complesso il pezzo fuso, più il valore di C_8 è basso.

ALLEGATO M

Fogli Excel utilizzati per il calcolo degli indici di complessità della verifica sperimentale

M.1 Fogli di calcolo utilizzati per il calcolo dell'indice di complessità del supporto carrello

descrizione	tolleranza più ristretta	tolleranza	rugosità	numero lati e diametri
feature1	0,00600	0,05800	6,30000	2,00000
feature2	0,00500	0,12000	6,30000	1,00000
feature3	0,00800	0,07000	6,30000	1,00000
feature4	0,00900	0,08400	6,30000	1,00000
feature5	0,00900	0,08400	6,30000	1,00000
feature6	0,01100	0,10000	6,30000	1,00000
feature7	0,00400	0,04000	6,30000	2,00000
feature 8	0,01300	0,05000	6,30000	2,00000

descrizione	numero utensili per fabbricare la feature	numero operazioni utilizzate per fabbricare la feature	numero assi macchina utilizzata per fabbricare la feature	numero controlli per la feature	tempo di asportazione truciolo per fabbricare la feature	numero piazzamenti per fare la feature
feature1	3,00000	3,00000	3,00000	0,00000	240,00000	1,00000
feature2	3,00000	3,00000	3,00000	1,00000	40,00000	1,00000
feature3	1,00000	1,00000	3,00000	0,00000	108,00000	1,00000
feature4	1,00000	1,00000	3,00000	0,00000	132,00000	1,00000
feature5	1,00000	1,00000	3,00000	0,00000	162,00000	1,00000
feature6	1,00000	1,00000	3,00000	0,00000	198,00000	1,00000
feature7	5,00000	3,00000	3,00000	0,00000	300,00000	2,00000
feature8	1,00000	1,00000	3,00000	0,00000	120,00000	1,00000

rugosità più ristretta	0,20000
numero max controlli sul pezzo	3,00000
tempo totale di esecuzione ciclo	28800,00000
numero max di piazzamenti	6,00000
numero max operazioni	10,00000
numero tipi di operazione	6,00000

descrizione	j=3					
	numero feature	aspetti geometrici per valutare feature				
		tolleranza più ristretta/ tolleranza feature	rugosità minore/ rugosità feature	1 - (1/numero lati feature + numero diametri feature)	SOMMA	SOMMA/j
feature1	4,00000	0,10345	0,03175	0,50000	0,63519	0,21173
feature2	2,00000	0,04167	0,03175	0,00000	0,07341	0,02447
feature3	1,00000	0,11429	0,03175	0,00000	0,14603	0,04868
feature4	2,00000	0,10714	0,03175	0,00000	0,13889	0,04630
feature5	3,00000	0,10714	0,03175	0,00000	0,13889	0,04630
feature6	2,00000	0,11000	0,03175	0,00000	0,14175	0,04725
feature7	3,00000	0,10000	0,03175	0,50000	0,63175	0,21058
feature8	1,00000	0,26000	0,03175	0,50000	0,79175	0,26392
numero totale di features	18,00000					

descrizione	k=6								
	numero operazioni		aspetti operazionali per valutare il processo di fabbricazione della feature						
		numero operazioni/ numero max operazioni	1 - (1/numero utensili utilizzati per fabbricare la feature)	1 - (1/assi macchina)	numero controlli feature/ numero max controlli	tempo di asportazione truciolo per fabbricare la feature/ tempo totale esecuzione ciclo	numero piazzamenti pezzo per fare la feature/ numero max piazzamenti	SOMMA	SOMMA/k
feature1	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,00000	0,00833	0,16667	1,80833	0,30139
feature2	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,33333	0,00139	0,16667	2,13472	0,35579
feature3	1,00000	0,10000	0,00000	0,66667	0,00000	0,00375	0,16667	0,93708	0,15618
feature4	1,00000	0,10000	0,00000	0,66667	0,00000	0,00458	0,16667	0,93792	0,15632
feature5	1,00000	0,10000	0,00000	0,66667	0,00000	0,00563	0,16667	0,93896	0,15649
feature6	1,00000	0,10000	0,00000	0,66667	0,00000	0,00688	0,16667	0,94021	0,15670
feature7	3,00000	0,30000	0,80000	0,66667	0,00000	0,01042	0,33333	2,11042	0,35174
feature8	1,00000	0,10000	0,00000	0,66667	0,00000	0,00417	0,16667	0,93750	0,15625
numero totale di operazioni	14,00000								

	complessità della feature	complessità pesata della feature
feature1	0,25016	0,05559
feature2	0,22326	0,02481
feature3	0,10243	0,00569
feature4	0,08297	0,00922
feature5	0,07385	0,01231
feature6	0,08373	0,00930
feature7	0,28116	0,04686
feature8	0,21008	0,01167
Complessità relativa del prodotto $c_{j,prodotto}$		0,17545

N = quantità informazioni	118,00000
n = varietà informazioni	23,00000
$D_{R,prodotto} = n / N$	0,19492
$H_{prodotto} (entropia) = \log_2 (N + 1)$	6,88264

indice di complessità totale del prodotto $CI_{prodotto} = (D_{R,prodotto} + c_{j,prodotto} \times 10) \times H_{prodotto}$	13,41704
---	----------

M.2 Fogli di calcolo utilizzati per il calcolo dell'indice di complessità della guida laterale destra

descrizione	tolleranza più ristretta	tolleranza	rugosità	numero lati e diametri
feature1	0,00900	0,08400	6,30000	2,00000
feature2	0,00900	0,08400	6,30000	2,00000
feature3	0,00900	0,08400	6,30000	2,00000
feature4	0,00800	0,07000	6,30000	2,00000
feature5	0,00500	0,05800	6,30000	2,00000
feature6	0,00900	0,08400	6,30000	2,00000
feature7	0,01300	0,12000	6,30000	1,00000

descrizione	numero utensili per fabbricare la feature	numero operazioni utilizzate per fabbricare la feature	numero assi macchina utilizzata per fabbricare la feature	numero controlli per la feature	tempo di asportazione truciolo per fabbricare la feature	numero piazzamenti per fare la feature
feature1	1,00000	1,00000	3,00000	0,00000	330,00000	1,00000
feature2	1,00000	1,00000	3,00000	0,00000	390,00000	1,00000
feature3	1,00000	1,00000	3,00000	0,00000	360,00000	1,00000
feature4	2,00000	2,00000	3,00000	1,00000	120,00000	2,00000
feature5	3,00000	3,00000	3,00000	1,00000	300,00000	3,00000
feature6	3,00000	3,00000	3,00000	1,00000	120,00000	1,00000
feature7	1,00000	1,00000	3,00000	0,00000	180,00000	1,00000

rugosità più ristretta	0,20000
numero max controlli sul pezzo	3,00000
tempo totale di esecuzione ciclo	28800,00000
numero max di piazzamenti	6,00000
numero max operazioni	10,00000
numero tipi di operazione	6,00000

descrizione	j=3					
	numero feature	aspetti geometrici per valutare feature				
		tolleranza più ristretta/ tolleranza feature	rugosità minore/ rugosità feature	1 - (1/numero lati feature + numero diametri feature)	SOMMA	SOMMA/j
feature1	1,00000	0,10714	0,03175	0,50000	0,63889	0,21296
feature2	2,00000	0,10714	0,03175	0,50000	0,63889	0,21296
feature3	1,00000	0,10714	0,03175	0,50000	0,63889	0,21296
feature4	4,00000	0,11429	0,03175	0,50000	0,64603	0,21534
feature5	6,00000	0,08621	0,03175	0,50000	0,61795	0,20598
feature6	3,00000	0,10714	0,03175	0,50000	0,63889	0,21296
feature7	1,00000	0,10833	0,03175	0,00000	0,14008	0,04669
numero totale di features	18,00000					

descrizione	k=6								
	numero operazioni		aspetti operazionali per valutare il processo di fabbricazione della feature						
		numero operazioni/ numero max operazioni	1 - (1/numero utensili utilizzati per fabbricare la feature)	1 - (1/assi macchina)	numero controlli feature/ numero max controlli	tempo di asportazione truciolo per fabbricare la feature/ tempo totale esecuzione ciclo	numero piazzamenti pezzo per fare la feature/ numero max piazzamenti	SOMMA	SOMMA/k
feature1	1,00000	0,10000	0,00000	0,66667	0,00000	0,01146	0,16667	0,94479	0,15747
feature2	1,00000	0,10000	0,00000	0,66667	0,00000	0,01354	0,16667	0,94688	0,15781
feature3	1,00000	0,10000	0,00000	0,66667	0,00000	0,01250	0,16667	0,94583	0,15764
feature4	2,00000	0,20000	0,50000	0,66667	0,33333	0,00417	0,33333	2,03750	0,33958
feature5	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,33333	0,01042	0,50000	2,47708	0,41285
feature6	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,33333	0,00417	0,16667	2,13750	0,35625
feature7	1,00000	0,10000	0,00000	0,66667	0,00000	0,00625	0,16667	0,93958	0,15660
numero totale di operazioni	12,00000								

	complessità della feature	complessità pesata della feature
feature1	0,18521	0,01029
feature2	0,19458	0,02162
feature3	0,18530	0,01029
feature4	0,25676	0,05706
feature5	0,27494	0,09165
feature6	0,28461	0,04743
feature7	0,10165	0,00565
Complessità relativa del prodotto $c_{i,prodotto}$		0,24399

N = quantità informazioni	106,00000
n = varietà informazioni	22,00000
$D_{R,prodotto} = n / N$	0,20755
$H_{prodotto} (entropia) = \log_2 (N + 1)$	6,72792

$$\text{indice di complessità totale del prodotto } CI_{\text{prodotto}} = (D_{R,\text{prodotto}} + C_{j,\text{prodotto}} \times 10) \times H_{\text{prodotto}}$$

17,81173

M.3 Fogli di calcolo utilizzati per il calcolo dell'indice di complessità del portamatrice per stampo di tranciatura

descrizione	tolleranza più ristretta	tolleranza	rugosità	numero lati e diametri
feature1	0,00600	0,01500	6,30000	1,00000
feature2	0,00600	0,05800	6,30000	2,00000
feature3	0,00500	0,04800	6,30000	2,00000
feature4	0,00600	0,01500	6,30000	1,00000
feature5	0,00900	0,02100	6,30000	2,00000
feature6	0,01500	0,03500	6,30000	1,00000
feature7	0,00900	0,08400	6,30000	1,00000
feature 8	0,01500	0,08400	6,30000	1,00000

descrizione	numero utensili per fabbricare la feature	numero operazioni utilizzate per fabbricare la feature	numero assi macchina utilizzata per fabbricare la feature	numero controlli per la feature	tempo di asportazione truciolo per fabbricare la feature	numero piazzamenti per fare la feature
feature1	3,00000	3,00000	3,00000	1,00000	420,00000	1,00000
feature2	3,00000	3,00000	3,00000	0,00000	480,00000	2,00000
feature3	3,00000	3,00000	3,00000	0,00000	390,00000	2,00000
feature4	3,00000	3,00000	3,00000	1,00000	390,00000	1,00000
feature5	1,00000	1,00000	3,00000	1,00000	600,00000	1,00000
feature6	2,00000	2,00000	3,00000	0,00000	3000,00000	1,00000
feature7	3,00000	3,00000	3,00000	0,00000	660,00000	1,00000
feature8	1,00000	1,00000	3,00000	0,00000	900,00000	1,00000

rugosità più ristretta	0,20000
numero max controlli sul pezzo	3,00000
tempo totale di esecuzione ciclo	28800,00000
numero max di piazzamenti	6,00000
numero max operazioni	10,00000
numero tipi di operazione	7,00000

descrizione	j=3					
	numero feature	aspetti geometrici per valutare feature				
		tolleranza più ristretta/ tolleranza feature	rugosità più ristretta/ rugosità feature	1 - (1/numero lati feature + numero diametri feature)	SOMMA	SOMMA/j
feature1	4,00000	0,40000	0,03175	0,00000	0,43175	0,14392
feature2	8,00000	0,10345	0,03175	0,50000	0,63519	0,21173
feature3	8,00000	0,10417	0,03175	0,50000	0,63591	0,21197
feature4	4,00000	0,40000	0,03175	0,00000	0,43175	0,14392
feature5	8,00000	0,42857	0,03175	0,50000	0,96032	0,32011
feature6	1,00000	0,42857	0,03175	0,00000	0,46032	0,15344
feature7	1,00000	0,10714	0,03175	0,00000	0,13889	0,04630
feature8	4,00000	0,17857	0,03175	0,00000	0,21032	0,07011
numero totale di features	38,00000					

descrizione	k=6								
	numero operazioni		aspetti operazionali per valutare il processo di fabbricazione della feature						
		numero operazioni/ numero max operazioni	1 - (1/numero utensili utilizzati per fabbricare la feature)	1 - (1/assi macchina)	numero controlli feature/ numero max controlli	tempo di asportazione truciolo per fabbricare la feature/ tempo totale esecuzione ciclo	numero piazzamenti pezzo per fare la feature/ numero max piazzamenti	SOMMA	SOMMA/k
feature1	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,33333	0,01458	0,16667	2,14792	0,35799
feature2	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,00000	0,01667	0,33333	1,98333	0,33056
feature3	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,00000	0,01354	0,33333	1,98021	0,33003
feature4	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,33333	0,01354	0,16667	2,14688	0,35781
feature5	1,00000	0,10000	0,00000	0,66667	0,33333	0,02083	0,16667	1,28750	0,21458
feature6	2,00000	0,20000	0,50000	0,66667	0,00000	0,10417	0,16667	1,63750	0,27292
feature7	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,00000	0,02292	0,16667	1,82292	0,30382
feature8	1,00000	0,10000	0,00000	0,66667	0,00000	0,03125	0,16667	0,96458	0,16076
numero totale di operazioni	19,00000								

	complessità della feature	complessità pesata della feature
feature1	0,23566	0,02481
feature2	0,24414	0,05140
feature3	0,24417	0,05140
feature4	0,23559	0,02480
feature5	0,30838	0,06492
feature6	0,23309	0,00613
feature7	0,23944	0,00630
feature8	0,08824	0,00929
Complessità relativa del prodotto $C_{j,prodotto}$		0,23905

N = quantità informazioni	143,00000
n = varietà informazioni	24,00000
$D_{R,prodotto} = n / N$	0,16783
$H_{prodotto} (entropia) = \log_2 (N + 1)$	7,15987

indice di complessità totale del prodotto $CI_{prodotto} = (D_{R,prodotto} + C_{j,prodotto} \times 10) \times H_{prodotto}$	18,31747
---	----------

M.4 Fogli di calcolo utilizzati per il calcolo dell'indice di complessità della matrice per stampo di tranciatura

descrizione	tolleranza più ristretta	tolleranza	rugosità	numero lati e diametri
feature1	0,00800	0,07000	6,30000	2,00000
feature2	0,00800	0,07000	6,30000	1,00000
feature3	0,00500	0,05800	6,30000	13,00000

descrizione	numero utensili per fabbricare la feature	numero operazioni utilizzate per fabbricare la feature	numero assi macchina utilizzata per fabbricare la feature	numero controlli per la feature	tempo di asportazione truciolo per fabbricare la feature	numero piazzamenti per fare la feature
feature1	3,00000	3,00000	3,00000	0,00000	420,00000	1,00000
feature2	3,00000	3,00000	3,00000	1,00000	360,00000	2,00000
feature3	3,00000	3,00000	3,00000	1,00000	18000,00000	2,00000

rugosità più ristretta	0,20000
numero max controlli sul pezzo	3,00000
tempo totale di esecuzione ciclo	28800,00000
numero max di piazzamenti	6,00000
numero max operazioni	10,00000
numero tipi di operazione	5,00000

descrizione	j=3					
	numero feature	aspetti geometrici per valutare la feature			SOMMA	SOMMA/j
		tolleranza più ristretta/ tolleranza feature	rugosità più ristretta/ rugosità feature	1 - (1/numero lati feature + numero diametri feature)		
feature1	5,00000	0,11429	0,03175	0,50000	0,64603	0,21534
feature2	2,00000	0,11429	0,03175	0,00000	0,14603	0,04868
feature3	2,00000	0,08621	0,03175	0,92308	1,04103	0,34701
numero totale di features	9,00000					

descrizione	k=6								
	numero operazioni	aspetti operazionali per valutare il processo di fabbricazione della feature						SOMMA	SOMMA/k
		numero operazioni/ numero max operazioni	1 - (1/numero utensili utilizzati per fabbricare feature)	1 - (1/assi macchina)	numero controlli feature/ numero max controlli	tempo di asportazione truciolo per fabbricare la feature/ tempo totale esecuzione ciclo	numero piazzamenti pezzo per fare la feature/ numero max piazzamenti		
feature1	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,00000	0,01458	0,16667	1,81458	0,30243
feature2	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,33333	0,01250	0,33333	2,31250	0,38542
feature3	3,00000	0,30000	0,66667	0,66667	0,33333	0,62500	0,33333	2,92500	0,48750
numero totale di operazioni	9,00000								

	complessità della feature	complessità pesata della feature
feature1	0,24800	0,13778
feature2	0,25072	0,05572
feature3	0,43130	0,09585
Complessità relativa del prodotto $C_{j,prodotto}$		0,28934

N = quantità informazioni	54,00000
n = varietà informazioni	17,00000
$D_{R,prodotto} = n / N$	0,31481
$H_{prodotto} (entropia) = \log_2 (N + 1)$	5,75489

indice di complessità totale del prodotto $CI_{prodotto} = (D_{R,prodotto} + C_{j,prodotto} \times 10) \times H_{prodotto}$	18,46289
---	----------

ALLEGATO N

Questionari relativi ai quattro pezzi testati e fogli Excel di elaborazione degli indici

Si riportano di seguito i quattro questionari con relative risposte.
relativi ai quattro prodotti testati e di seguito le relative elaborazioni dei punteggi.

N.1 Questionario relativo al supporto carrello lento

5. Indicare se il prodotto è un componente singolo o un assemblato:

B) Componente singolo _____ [×]

B) Assemblato _____ []

6. Indicare i materiali con cui viene fabbricato il prodotto:

1) Acciaio C40	7)
2)	8)
3)	9)
4)	10)
5)	11)
6)	12)

7. Indicare il numero di componenti di cui è costituito il prodotto

(rispondere solo in caso di risposta B alla domanda 1):

< 10	11-20	21-50	51-100	101-150	151-200	201-250	>250
------	-------	-------	--------	---------	---------	---------	------

8. Indicare la complessità geometrica del prodotto. In caso di risposta B alla domanda 1, riferirsi al componente di geometria più complessa:

1 pressoché inesistente	2 bassa	3 discreta	4 elevata	5 molto elevata
-------------------------	--------------------	------------	-----------	-----------------

9. Indicare la tolleranza dimensionale del prodotto o quella più ristretta tra i componenti che costituiscono il prodotto (secondo norma UNI ISO 286/1):

<IT001	IT001-IT2	IT5-IT4	IT5-IT7	IT8-IT9	IT10-IT11	IT12-IT13	>IT14
--------	-----------	---------	---------	---------	----------------------	-----------	-------

10. Indicare il grado di finitura superficiale più elevato richiesto ai componenti del prodotto misurata come R_a in μm :

< 0,025	0,025 - 0,1	0,1 - 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 3	3 - 6	6 - 12,5	>12,5
---------	-------------	-----------	-----------	---------	-------	---------------------	-------

11. Indicare su quali basi viene effettuata la produzione:

- ~~×~~ Produzione su commessa
- Produzione di prodotto a catalogo

12. Indicare il tempo di fabbricazione del prodotto (in ore):

<1	1-5	5-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
------------------	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

13. Indicare il numero di lavorazioni che vengono eseguite sul prodotto (ciclo di lavorazione)

Numero complessivo lavorazioni	14
--------------------------------	----

14. Indicare la varietà delle lavorazioni che vengono eseguite sul prodotto (ciclo di lavorazione)

Varietà delle lavorazioni (numero dei diversi tipi di lavorazioni utilizzate per ex. fresatura, tornitura, taglio Laser ecc.)	6
---	---

15. Indicare il numero di tecnologie (ex. CNC, Laser, T.T. ecc.) utilizzate per fabbricare il prodotto:

1	2	3	4	5	6	7	8
--------------	---	---	---	---	---	---	---

16. Indicare il tempo medio di set-up delle macchine per la lavorazione sul prodotto (in minuti):

<30	30-60	61-150 (3 ore)	151-360 (6 ore)	361-600 (10 ore)	601-960 (16 ore)	961- 1440 (24 ore)	>1440
-----	------------------	----------------	-----------------	------------------	------------------	--------------------	-------

17. Indicare il grado di abilità/competenza richiesto agli operatori per la fabbricazione del prodotto:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	--------------------	------------	-----------	-----------------

18. Indicare il numero dei controlli e test sul prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
----------------	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

19. Indicare il massimo grado di complessità dei controlli e test:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
------------------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

20. Indicare il numero di utensili utilizzati per fabbricare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	------	------------------	-------	-------	--------	------

21. Indicare il massimo grado di complessità degli utensili (molto elevato → utensile speciale costruito su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
------------------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

22. Indicare il numero di attrezzature utilizzate per fabbricare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	----------------	------	-------	-------	-------	--------	------

23. Indicare il massimo grado di complessità delle attrezzature (molto elevato → attrezzatura speciale progettata e costruita su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
------------------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

20. Indicare il grado di difficoltà dell'operazione di assemblaggio:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

21. Indicare il numero di attrezzature utilizzate per assemblare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

22. Indicare il massimo grado di complessità delle attrezzature per l'assemblaggio (molto elevato → attrezzatura speciale progettata e costruita su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

23. Indicare il grado di abilità/competenza degli operatori di assemblaggio:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	------------	-----------	-----------------

24. Indicare il livello di affidabilità richiesto al prodotto:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	-----------------------	-----------	-----------------

25. Indicare il livello qualitativo che deve avere il prodotto per soddisfare le esigenze del cliente target:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	--------------------	------------	-----------	-----------------

26. Indicare i settori ingegneristici e scientifici integrati nel prodotto in oggetto:

<ul style="list-style-type: none"> • elettrico • elettronico • fluidodinamico • termodinamico 	<ul style="list-style-type: none"> • meccanico × • informatico • chimico • _____
---	--

27. Indicare il numero di addetti, interni all'impresa, coinvolti nella realizzazione del prodotto:

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
---	----------------	------	-------	-------	-------	-------	-----

28. Indicare il numero di attori (fornitori e consulenti), esterni all'impresa, coinvolti nella realizzazione del prodotto:

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
--------------	-----	------	-------	-------	-------	-------	-----

29. Indicare il numero di viste e sezioni utilizzate per rappresentare il prodotto:

1	2-3	4-6	7-10	11-20	21-30	31-50	>50
---	----------------	-----	------	-------	-------	-------	-----

N.2 Questionario relativo alla guida laterale destra

1. Indicare se il prodotto è un componente singolo o un assemblato:

C) Componente singolo _____ [×]

B) Assemblato _____ []

2. Indicare i materiali con cui viene fabbricato il prodotto:

1) Alluminio	7)
2)	8)
3)	9)
4)	10)
5)	11)

6)	12)
----	-----

3. Indicare il numero di componenti di cui è costituito il prodotto (rispondere solo in caso di risposta B alla domanda 1):

< 10	11-20	21-50	51-100	101-150	151-200	201-250	>250
------	-------	-------	--------	---------	---------	---------	------

4. Indicare la complessità geometrica del prodotto. In caso di risposta B alla domanda 1, riferirsi al componente di geometria più complessa:

1 pressoché inesistente	2 bassa	3 discreta	4 elevata	5 molto elevata
-------------------------	---------	-----------------------	-----------	-----------------

5. Indicare la tolleranza dimensionale del prodotto o quella più ristretta tra i componenti che costituiscono il prodotto (secondo norma UNI ISO 286/1):

<IT001	IT001-IT2	IT5-IT4	IT5-IT7	IT8-IT9	IT10-IT11	IT12-IT13	>IT14
--------	-----------	---------	---------	---------	----------------------	-----------	-------

6. Indicare il grado di finitura superficiale più elevato richiesto ai componenti del prodotto misurata come R_a in μm :

< 0,025	0,025 - 0,1	0,1 - 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 3	3 - 6	6 - 12,5	>12,5
---------	-------------	-----------	-----------	---------	------------------	----------	-------

7. Indicare su quali basi viene effettuata la produzione:

- × Produzione su commessa
- Produzione di prodotto a catalogo

8. Indicare il tempo di fabbricazione del prodotto (in ore):

<1	1-5	5-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
------------------	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

9. Indicare il numero di lavorazioni che vengono eseguite sul prodotto (ciclo di lavorazione)

Numero complessivo lavorazioni	12
--------------------------------	----

10. Indicare la varietà delle lavorazioni che vengono eseguite sul prodotto (ciclo di lavorazione)

Varietà delle lavorazioni (numero dei diversi tipi di lavorazioni utilizzate per ex. fresatura, tornitura, taglio Laser ecc.)	6
---	---

11. Indicare il numero di tecnologie (ex. CNC, Laser, T.T. ecc.) utilizzate per fabbricare il prodotto:

1	2	3	4	5	6	7	8
--------------	---	---	---	---	---	---	---

12. Indicare il tempo medio di set-up delle macchine per la lavorazione sul prodotto (in minuti):

<30	30-60	61-150 (3 ore)	151-360 (6 ore)	361-600 (10 ore)	601-960 (16 ore)	961- 1440 (24 ore)	>1440
-----	------------------	----------------	-----------------	------------------	------------------	--------------------	-------

13. Indicare il grado di abilità/competenza richiesto agli operatori per la fabbricazione del prodotto:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	--------------------	------------	-----------	-----------------

14. Indicare il numero dei controlli e test sul prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	----------------	------	-------	-------	-------	--------	------

15. Indicare il massimo grado di complessità dei controlli e test:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
------------------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

16. Indicare il numero di utensili utilizzati per fabbricare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	-----------------	-------	-------	-------	--------	------

17. Indicare il massimo grado di complessità degli utensili (molto elevato → utensile speciale costruito su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
------------------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

18. Indicare il numero di attrezzature utilizzate per fabbricare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	----------------	------	-------	-------	-------	--------	------

19. Indicare il massimo grado di complessità delle attrezzature (molto elevato → attrezzatura speciale progettata e costruita su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
------------------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

20. Indicare il grado di difficoltà dell'operazione di assemblaggio:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

21. Indicare il numero di attrezzature utilizzate per assemblare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

22. Indicare il massimo grado di complessità delle attrezzature per l'assemblaggio (molto elevato → attrezzatura speciale progettata e costruita su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

23. Indicare il grado di abilità/competenza degli operatori di assemblaggio:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	------------	-----------	-----------------

24. Indicare il livello di affidabilità richiesto al prodotto:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	-----------------------	-----------	-----------------

25. Indicare il livello qualitativo che deve avere il prodotto per soddisfare le esigenze del cliente target:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	------------	----------------------	-----------------

26. Indicare i settori ingegneristici e scientifici integrati nel prodotto in oggetto:

<ul style="list-style-type: none"> • elettrico • elettronico • fluidodinamico • termodinamico 	<ul style="list-style-type: none"> • meccanico × • informatico • chimico • _____
---	--

27. Indicare il numero di addetti, interni all'impresa, coinvolti nella realizzazione del prodotto:

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
---	----------------	------	-------	-------	-------	-------	-----

28. Indicare il numero di attori (fornitori e consulenti), esterni all'impresa, coinvolti nella realizzazione del prodotto:

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
--------------	-----	------	-------	-------	-------	-------	-----

29. Indicare il numero di viste e sezioni utilizzate per rappresentare il prodotto:

1	2-3	4-6	7-10	11-20	21-30	31-50	>50
---	----------------	-----	------	-------	-------	-------	-----

N.3 Questionario relativo al portamatrice per stampo di tranciatura

1. Indicare se il prodotto è un componente singolo o un assemblato:

D) Componente singolo _____ [×]

B) Assemblato _____ []

2. Indicare i materiali con cui viene fabbricato il prodotto:

1) Acciaio 2738	7)
2)	8)
3)	9)
4)	10)
5)	11)
6)	12)

3. Indicare il numero di componenti di cui è costituito il prodotto

(rispondere solo in caso di risposta B alla domanda 1):

< 10	11-20	21-50	51-100	101-150	151-200	201-250	>250
------	-------	-------	--------	---------	---------	---------	------

4. Indicare la complessità geometrica del prodotto. In caso di risposta B alla domanda 1, riferirsi al componente di geometria più complessa:

1 pressoché inesistente	2 bassa	3 discreta	4 elevata	5 molto elevata
-------------------------	---------	-----------------------	-----------	-----------------

5. Indicare la tolleranza dimensionale del prodotto o quella più ristretta tra i componenti che costituiscono il prodotto (secondo norma UNI ISO 286/1):

<IT001	IT001-IT2	IT5-IT4	IT5-IT7	IT8-IT9	IT10-IT11	IT12-IT13	>IT14
--------	-----------	---------	---------	---------	-----------	-----------	-------

6. Indicare il grado di finitura superficiale più elevato richiesto ai componenti del prodotto misurata come R_a in μm :

< 0,025	0,025 - 0,1	0,1 - 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 3	3 - 6	6 - 12,5	>12,5
---------	-------------	-----------	-----------	---------	-------	---------------------	-------

7. Indicare su quali basi viene effettuata la produzione:

- ~~×~~ Produzione su commessa
- Produzione di prodotto a catalogo

8. Indicare il tempo di fabbricazione del prodotto (in ore):

<1	1-5	5-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
----	----------------	------	-------	-------	-------	--------	------

9. Indicare il numero di lavorazioni che vengono eseguite sul prodotto (ciclo di lavorazione)

Numero complessivo lavorazioni	19
--------------------------------	----

10. Indicare la varietà delle lavorazioni che vengono eseguite sul prodotto (ciclo di lavorazione)

Varietà delle lavorazioni (numero dei diversi tipi di lavorazioni utilizzate per ex. fresatura, tornitura, taglio Laser ecc.)	7
---	---

11. Indicare il numero di tecnologie (ex. CNC, Laser, T.T. ecc.) utilizzate per fabbricare il prodotto:

1	2	3	4	5	6	7	8
--------------	---	---	---	---	---	---	---

12. Indicare il tempo medio di set-up delle macchine per la lavorazione sul prodotto (in minuti):

<30	30-60	61-150 (3 ore)	151-360 (6 ore)	361-600 (10 ore)	601-960 (16 ore)	961- 1440 (24 ore)	>1440
-----	------------------	----------------	-----------------	------------------	------------------	--------------------	-------

13. Indicare il grado di abilità/competenza richiesto agli operatori per la fabbricazione del prodotto:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	-----------------------	-----------	-----------------

14. Indicare il numero dei controlli e test sul prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	----------------	------	-------	-------	-------	--------	------

15. Indicare il massimo grado di complessità dei controlli e test:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
------------------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

16. Indicare il numero di utensili utilizzati per fabbricare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	------	------------------	-------	-------	--------	------

17. Indicare il massimo grado di complessità degli utensili (molto elevato → utensile speciale costruito su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
------------------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

18. Indicare il numero di attrezzature utilizzate per fabbricare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	----------------	------	-------	-------	-------	--------	------

19. Indicare il massimo grado di complessità delle attrezzature (molto elevato → attrezzatura speciale progettata e costruita su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
------------------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

20. Indicare il grado di difficoltà dell'operazione di assemblaggio:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

21. Indicare il numero di attrezzature utilizzate per assemblare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

22. Indicare il massimo grado di complessità delle attrezzature per l'assemblaggio (molto elevato → attrezzatura speciale progettata e costruita su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

23. Indicare il grado di abilità/competenza degli operatori di assemblaggio:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	------------	-----------	-----------------

24. Indicare il livello di affidabilità richiesto al prodotto:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	-----------------------	-----------	-----------------

25. Indicare il livello qualitativo che deve avere il prodotto per soddisfare le esigenze del cliente target:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	------------	----------------------	-----------------

26. Indicare i settori ingegneristici e scientifici integrati nel prodotto in oggetto:

<ul style="list-style-type: none"> • elettrico • elettronico • fluidodinamico • termodinamico 	<ul style="list-style-type: none"> • meccanico × • informatico • chimico • _____
---	--

27. Indicare il numero di addetti, interni all'impresa, coinvolti nella realizzazione del prodotto:

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
---	----------------	------	-------	-------	-------	-------	-----

28. Indicare il numero di attori (fornitori e consulenti), esterni all'impresa, coinvolti nella realizzazione del prodotto:

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
--------------	-----	------	-------	-------	-------	-------	-----

29. Indicare il numero di viste e sezioni utilizzate per rappresentare il prodotto:

1	2-3	4-6	7-10	11-20	21-30	31-50	>50
---	----------------	-----	------	-------	-------	-------	-----

N.4 Questionario relativo alla matrice per stampo di tranciatura

1. Indicare se il prodotto è un componente singolo o un assemblato:

- E) Componente singolo _____ [×]
 B) Assemblato _____ []

2. Indicare i materiali con cui viene fabbricato il prodotto:

1) Acciaio K110	7)
2)	8)
3)	9)
4)	10)
5)	11)
6)	12)

3. Indicare il numero di componenti di cui è costituito il prodotto
(rispondere solo in caso di risposta B alla domanda 1):

< 10	11-20	21-50	51-100	101-150	151-200	201-250	>250
------	-------	-------	--------	---------	---------	---------	------

4. Indicare la complessità geometrica del prodotto. In caso di risposta B alla domanda 1, riferirsi al componente di geometria più complessa:

1 pressoché inesistente	2 bassa	3 discreta	4 elevata	5 molto elevata
-------------------------	---------	-----------------------	-----------	-----------------

5. Indicare la tolleranza dimensionale del prodotto o quella più ristretta tra i componenti che costituiscono il prodotto (secondo norma UNI ISO 286/1):

<IT001	IT001-IT2	IT5-IT4	IT5-IT7	IT8-IT9	IT10-IT11	IT12-IT13	>IT14
--------	-----------	---------	---------	---------	----------------------	-----------	-------

6. Indicare il grado di finitura superficiale più elevato richiesto ai componenti del prodotto misurata come R_a in μm :

< 0,025	0,025 - 0,1	0,1 - 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 3	3 - 6	6 - 12,5	>12,5
---------	-------------	-----------	-----------	---------	-------	---------------------	-------

7. Indicare su quali basi viene effettuata la produzione:

- Produzione su commessa
- Produzione di prodotto a catalogo

8. Indicare il tempo di fabbricazione del prodotto (in ore):

<1	1-5	5-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
----	-----	-----------------	-------	-------	-------	--------	------

9. Indicare il numero di lavorazioni che vengono eseguite sul prodotto (ciclo di lavorazione)

Numero complessivo lavorazioni	9
--------------------------------	---

10. Indicare la varietà delle lavorazioni che vengono eseguite sul prodotto (ciclo di lavorazione)

Varietà delle lavorazioni (numero dei diversi tipi di lavorazioni utilizzate per ex. fresatura, tornitura, taglio Laser ecc.)	5
---	---

11. Indicare il numero di tecnologie (ex. CNC, Laser, T.T. ecc.) utilizzate per fabbricare il prodotto:

1	2	3	4	5	6	7	8
--------------	---	---	---	---	---	---	---

12. Indicare il tempo medio di set-up delle macchine per la lavorazione sul prodotto (in minuti):

<30	30-60	61-150 (3 ore)	151-360 (6 ore)	361-600 (10 ore)	601-960 (16 ore)	961- 1440 (24 ore)	>1440
-------------------	-------	----------------	-----------------	------------------	------------------	--------------------	-------

13. Indicare il grado di abilità/competenza richiesto agli operatori per la fabbricazione del prodotto:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	-----------------------	-----------	-----------------

14. Indicare il numero dei controlli e test sul prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
----------------	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

15. Indicare il massimo grado di complessità dei controlli e test:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
------------------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

16. Indicare il numero di utensili utilizzati per fabbricare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	-----------------	-------	-------	-------	--------	------

17. Indicare il massimo grado di complessità degli utensili (molto elevato → utensile speciale costruito su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	-----------------------	-----------	-----------------

18. Indicare il numero di attrezzature utilizzate per fabbricare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	----------------	------	-------	-------	-------	--------	------

19. Indicare il massimo grado di complessità delle attrezzature (molto elevato → attrezzatura speciale progettata e costruita su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	-----------------------	-----------	-----------------

20. Indicare il grado di difficoltà dell'operazione di assemblaggio:

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

21. Indicare il numero di attrezzature utilizzate per assemblare il prodotto:

1-2	3-5	6-10	10-20	20-30	30-50	50-100	>100
-----	-----	------	-------	-------	-------	--------	------

22. Indicare il massimo grado di complessità delle attrezzature per l'assemblaggio (molto elevato → attrezzatura speciale progettata e costruita su specifico progetto):

1 pressoché inesistente	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
-------------------------	---------	------------	-----------	-----------------

23. Indicare il grado di abilità/competenza degli operatori di assemblaggio:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	------------	-----------	-----------------

24. Indicare il livello di affidabilità richiesto al prodotto:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	------------	----------------------	-----------------

25. Indicare il livello qualitativo che deve avere il prodotto per soddisfare le esigenze del cliente target:

1 minimo	2 basso	3 discreto	4 elevato	5 molto elevato
----------	---------	------------	----------------------	-----------------

26. Indicare i settori ingegneristici e scientifici integrati nel prodotto in oggetto:

<ul style="list-style-type: none"> • elettrico • elettronico • fluidodinamico • termodinamico 	<ul style="list-style-type: none"> • meccanico × • informatico • chimico • _____
---	--

27. Indicare il numero di addetti, interni all'impresa, coinvolti nella realizzazione del prodotto:

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
---	----------------	------	-------	-------	-------	-------	-----

28. Indicare il numero di attori (fornitori e consulenti), esterni all'impresa, coinvolti nella realizzazione del prodotto:

1	2-5	6-10	11-20	21-30	31-40	40-50	>50
--------------	-----	------	-------	-------	-------	-------	-----

29. Indicare il numero di viste e sezioni utilizzate per rappresentare il prodotto:

1	2-3	4-6	7-10	11-20	21-30	31-50	>50
---	----------------	-----	------	-------	-------	-------	-----

N.1bis Fogli di calcolo utilizzati per il calcolo dell'indice di complessità del supporto carrello

numero domanda	peso p_i	complessità i-esima c_i	$p_i \times c_i$
1	4	0,5	2
2	3	0,05	0,15
3	8	0	0
4	5	0,4	2
5	7	0,375	2,625
6	4	0,25	1
7	2	1	2
8	3	0,125	0,375
9	2	0,5	1
10	6	0,3	1,8
11	4	0,125	0,5
12	1	0,25	0,25
13	5	0,4	2
14	2	0,125	0,25
15	1	0,2	0,2
16	3	0,5	1,5
17	4	0,2	0,8
18	2	0,25	0,5
19	3	0,2	0,6
20	4	0	0
21	3	0	0
22	3	0	0
23	4	0	0
24	3	0,6	1,8
25	4	0,4	1,6
26	4	0,125	0,5
27	2	0,25	0,5
28	1	0,125	0,125
29	3	0,25	0,75
peso totale	100	sommatoria $p_i \times c_i$	24,825

indice di complessità I_c	0,24825
-----------------------------	---------

N.2bis Fogli di calcolo utilizzati per il calcolo dell'indice di complessità della guida laterale destra

numero domanda	peso p_i	complessità i-esima c_i	$p_i \times c_i$
1	4	0,5	2
2	3	0,05	0,15
3	8	0	0
4	5	0,6	3
5	7	0,375	2,625
6	4	0,375	1,5
7	2	1	2
8	3	0,125	0,375
9	2	0,5	1
10	6	0,3	1,8
11	4	0,125	0,5
12	1	0,25	0,25
13	5	0,4	2
14	2	0,25	0,5
15	1	0,2	0,2
16	3	0,375	1,125
17	4	0,2	0,8
18	2	0,25	0,5
19	3	0,2	0,6
20	4	0	0
21	3	0	0
22	3	0	0
23	4	0	0
24	3	0,6	1,8
25	4	0,8	3,2
26	4	0,125	0,5
27	2	0,25	0,5
28	1	0,125	0,125
29	3	0,25	0,75
peso totale	100	sommatoria $p_i \times c_i$	27,8

indice di complessità I_c	0,27800
-----------------------------	---------

N.3bis Fogli di calcolo utilizzati per il calcolo dell'indice di complessità del portamatrice per stampo di tranciatura

numero domanda	peso p_i	complessità i-esima c_i	$p_i \times c_i$
1	4	0,5	2
2	3	0,05	0,15
3	8	0	0
4	5	0,6	3
5	7	0,625	4,375
6	4	0,25	1
7	2	1	2
8	3	0,25	0,75
9	2	0,5	1
10	6	0,35	2,1
11	4	0,125	0,5
12	1	0,25	0,25
13	5	0,6	3
14	2	0,25	0,5
15	1	0,2	0,2
16	3	0,5	1,5
17	4	0,2	0,8
18	2	0,25	0,5
19	3	0,2	0,6
20	4	0	0
21	3	0	0
22	3	0	0
23	4	0	0
24	3	0,6	1,8
25	4	0,8	3,2
26	4	0,125	0,5
27	2	0,25	0,5
28	1	0,125	0,125
29	3	0,25	0,75
peso totale	100	sommatoria $p_i \times c_i$	31,1

indice di complessità I_c	0,31100
-----------------------------	---------

N.4bis Fogli di calcolo utilizzati per il calcolo dell'indice di complessità della matrice per stampo di tranciatura

numero domanda	peso p_i	complessità i-esima c_i	$p_i \times c_i$
1	4	0,5	2
2	3	0,05	0,15
3	8	0	0
4	5	0,6	3
5	7	0,375	2,625
6	4	0,25	1
7	2	1	2
8	3	0,375	1,125
9	2	0,375	0,75
10	6	0,25	1,5
11	4	0,125	0,5
12	1	0,125	0,125
13	5	0,6	3
14	2	0,125	0,25
15	1	0,2	0,2
16	3	0,375	1,125
17	4	0,6	2,4
18	2	0,25	0,5
19	3	0,6	1,8
20	4	0	0
21	3	0	0
22	3	0	0
23	4	0	0
24	3	0,8	2,4
25	4	0,8	3,2
26	4	0,125	0,5
27	2	0,25	0,5
28	1	0,125	0,125
29	3	0,25	0,75
peso totale	100	sommatoria $p_i \times c_i$	31,525

indice di complessità I_c	0,31525
-----------------------------	---------

GLOSSARIO

Clustering: tecnica di analisi dei dati volta alla selezione e raggruppamento di elementi omogenei in sottoinsiemi di dati. L'appartenenza o meno di un dato a un insieme dipende da quanto l'elemento preso in esame è distante dall'insieme.

CNC: macchina di produzione a Controllo Numerico Computerizzato

Concurrent Engineering: insieme di metodologie, tecniche e strumenti che consentono un approccio integrato alla progettazione e al relativo processo produttivo di un prodotto. Tale approccio permette di ridurre drasticamente le modifiche al prodotto e i tempi di sviluppo e i costi connessi, consente maggiore flessibilità oltre che una migliore qualità dei prodotti.

Customizzazione: personalizzazione del prodotto in funzione delle esigenze del cliente

Data mining: tecnica avente per oggetto l'estrazione di specifiche informazioni a partire da grandi quantità di dati (attraverso metodi automatici o semi-automatici) e l'utilizzazione operativa di questo sapere

Data warehouse: archivio informatico contenente tutti i dati e le informazioni relativi ad una organizzazione

DEA: Data Envelope Analysis: metodo che determina l'efficienza di ciascuna unità produttiva comparando la sua tecnologia con tutte le possibili tecnologie derivanti dalla combinazione lineare delle produzioni osservate per le altre unità produttive considerate.

Distinta base: definisce tutte le informazioni e la struttura di un prodotto attraverso la lista dei nomi e quantità dei componenti allo scopo di comunicare all'ufficio acquisti i componenti da ordinare, ottenere la lista dei componenti per predisporre, i cicli di lavorazione, calcolare il costo del prodotto.

FMC: Flexible Manufacturing Cell: cella di lavorazione costituita da diverse macchine e un robot che movimentano i pezzi da una all'altra. Ogni cella è specializzata nel produrre i pezzi di una famiglia. Non tutti i pezzi della stessa famiglia subiscono tutte le lavorazioni che la cella può eseguire.

FMS: Flexible Manufacturing System → sistema di fabbricazione flessibile: linea di produzione costituita da un insieme di centri di lavoro e celle contenenti macchine CNC collegate da sistemi di trasporto flessibile.

Group Technology: creazione di famiglie di prodotti con somiglianze morfologiche e tecnologiche che condividono le stesse attrezzature produttive

Just in Time: filosofia industriale che prevede un sistema di tipo *push*: tutta la produzione viene pianificata in base a *previsioni di vendita* indipendentemente dalle reali esigenze del mercato. Ogni fase produttiva è programmata in funzione della fase successiva. E' la produzione a spingere i prodotti sul mercato.

Kanban: è il termine giapponese che letteralmente significa "cartellino" e indica un elemento del sistema Just in time di reintegrazione delle scorte mano a mano che vengono consumate. Il kanban, indicante la tipologia del materiale usato per una lavorazione, è apposto su un contenitore in cui vengono riposti i componenti e il prodotto man mano che viene assemblato.

Knowledge-Base: processo che combina conoscenza ingegneristica, del processo, metodologie, regole, e "best practice" per creare un modello di prodotto che descriva come sviluppare i progetti o condurre le analisi di ingegneria.

Layout: disposizione dei macchinari di produzione all'interno dello stabilimento

Lead Time: tempo di attraversamento del pezzo nel Lay out produttivo (grezzo di partenza → prodotto finito), cioè tempo che intercorre tra il momento in cui inizia il processo di produzione e il momento in cui viene portato a termine.

Routeing: smistamento dei pezzi attraverso i diversi macchinari di produzione

R&D: Research & Development → ricerca e sviluppo

Scheduling: in ambito produttivo indica la programmazione di operazioni, processi e macchinari per la fabbricazione dei prodotti

Time Compression: compressione dei tempi di produzione ai fini di una riduzione dei relativi costi

Time-to-market: tempo che trascorre dall'ideazione di un prodotto alla sua effettiva entrata in servizio. Il time to market comprende le fasi di studio di mercato, studi di fattibilità, ingegnerizzazione, creazione di un prototipo, produzione, immissione sul mercato.

WIP: Work in Process: numero di unità contemporaneamente presenti nel processo di produzione

BIBLIOGRAFIA

1. Introduzione

- [1] V.Tang, V.Salminen, "Towards a theory of complicatedness: frame work for complex systems analysis and design", 13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, Scotland, August 2001
- [2] H.P.Wiendahl, P.Scholtissek, "Management and control of complexity in manufacturing", CIRP ANNALS, vol.43/2/1994
- [3] G.B. Scuricini, "Cibernetica e noetica. Dal controllo delle macchine al governo dei sistemi umani", editore Sansoni, Firenze, 1985
- [4] K.K.B.Hon, "Complexity and Agility in Manufacturing", 7th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Guangzhou, China, November 28-30, 2000
- [5] D.Baccarini, "The concept of project complexity" – a review", International Journal of Project Management vol. 14, n.4, pp.201-204, Elsevier Science, 1996
- [6] A.Größler, A.Grübner e P.Milling 2006, "Organisational adaption processes to external complexity", International Journal of Operations & Production Management, vol.26, n.3, pp.254-281, Emerald Group, 2006
- [7] A.V.Deshmukh, J.J.Tavalage, M.M.Barash, "Characteristics of Part Mix Complexity Measure for Manufacturing Systems", IEEE, 1992
- [8] S.Sivadasan, J.Efstathiou A Calinescu L.Huaccho Huatuco "Advances on measuring the operational complexity of supplier-customer systems", European Journal of Operational Research 171, pp.208-226, Elsevier Science, 2006
- [9] J.Peklenik "Complexity and emergence of work systems in manufacturing", CIRP Journal of Manufacturing Systems, vol.34/2/ 2005
- [10] A.Calinescu, J.Efstathiou, J.Schirn, J.Bermejo "Applying and assessing two methods for measuring complexity in manufacturing", Journal of the Operational Research Society, vol. 49, pp.723-733, Operational Research Society, 1998
- [11] B.R.Meijer, "To manage or not to manage complexity", IEMC, 1998
- [12] G.Tani, B.Cimatti, "Technological Complexity: a support to management decisions for product engineering and manufacturing", International Engineering Management Conference Singapore, 8-11 December, 2008

2. Indicatori

- [13] K.K.B.Hon, "Performance and evaluation of manufacturing systems", *Annals of the CIRP*, STC 0, 54/2, p.675, 2005
- [14] T.Grunberg, "Performance improvement – towards a method for finding and prioritising potential performance improvement areas in manufacturing operations", *International Journal of Productivity and Performance Management* vol.53,n.1, pp.52-71, Emerald, 2004
- [15] F.Franceschini, M. Galetto, D.Maisano, "Management by measurement – Design Key Indicators and Performance Measurement Systems", Springer , 2007
- [16] J.Nenadal, "Process performance measurement in manufacturing organizations", *International Journal of Productivity and Performance Management* vol.57,n.6, pp.460-467, Emerald, 2008
- [17] J.Agrell, B.Martin West, "A caveat on the measurement of productive efficiency", *International Journal of Production Economics*, vol. 69, pp.1-14, Elsevier, 2001
- [18] T.C.Koopmans, "An analysis of production as an efficient combination of activities". Tratto da: "Activity Analysis of Production and Allocation", Cowles Commission Research in Economics. Monograph number n.13, Wiley & Sons, New York, 1951
- [19] G.Debreu "The coefficient of resource utilization", *Econometrica*, Journal of Econometric Society vol.19, n.3 pp. 273-292, 1951.
- [20] M.J Farrel, "The measurement of productive efficiency" *Journal of Royal Statistic Society*,vol. 120, pp. 253-290, 1957.
- [21] E.F.Sudit, "Productivity measurement in industrial operations", *European Journal of Operational Research* vol.85, pp.435-453, Elsevier, 1995
- [22] J.Ruggiero, "Measuring technical efficiency", *European Journal of Operational Research*, vol.121, pp.138-150, Elsevier, 2000
- [23] A.De Toni, G.Nassimbeni, S.Tonchia, "An integrated production performance measurement system", *Industrial Management and Data System*, n.5, pp.180-186, University Press, 1997
- [24] B.A. Behrens, P.Lau, "Key performance indicators for sheet metal forming processes", *Prod.Eng.Res.Devel.*, n.2, pp.73-78, 2008
- [25] L.Berrah, G.Mauris, J.Montmain, "Monitoring the improvement of an overall industrial performance based on a Choquet integral aggregation", *The International Journal of Management Science*, pp.340-351, Elsevier, 2008

- [26] G.Tekin Temur, B.Emeksizoglu, S.Goszlu, "A study on performance measurement of a plastic packaging organization's manufacturing system by AHP modeling", PICMET Proceedings, 5-9 august, Portland, Oregon, USA, 2007
- [27] L. Fortuin, "Performance indicators – why, where and how?", European Journal of Operational Research, vol.34, pp.1-9, Elsevier, 1988
- [28] M.W.Meyer "Rethinking Performance Measurement", Cambridge University Press, 2002.
- [29] L.Berrah, G.Mauris, L.Foulloy, A.Haurat, "Possibility/necessity semantics for the evaluation of the manufacturing processes performance", IEEE, 1998
- [30] C.Leachman, C.C, Pegels, S.K.Shin, "Manufacturing performance: evaluation and determinants", International Journal of Operations & Production Management vol.25, n.9, pp.851-874, Emerald, 2005
- [31] S. Nakajima, "TPM Total Productive Maintenance", monografia, ISEDI 1992
- [32] P.Muchiri, L.Pintelon, "Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion", International Journal of Production Research, vol.46, n.13, pp.3517-3535, Taylor and Francis, 2008
- [33] S.Loughlin, "A holistic approach to Overall Equipment Effectiveness (OEE)", IEE Computing & Control Engineering, December/January 2003/2004
- [34] S.H.Huang, J.P.Dismukes, J.Shi, Q.Su, M.A.Razzak, R.Bodhale, D.E.Robinson, "Manufacturing productivity improvement using effectiveness metrics and simulation analysis.", International Journal of Production Research, vol.41, n.3, pp 513-527, Taylor and Francis, 2003
- [35] R.M.Nacchiappan, N.Anantharaman, "Evaluation of Overall Line Effectiveness (OLE) in a continuous product line manufacturing system", Journal of Manufacturing Technology Management, vol.17, n.7, pp.987-1008, Emerald, 2006
- [36] A.Raouf, "Improving Capital Productivity through Maintenance", International Journal of Operations & Production Management, vol.14, n.7, pp.44-52, University Press, 1994
- [37] C.Chen, "An objective-oriented and product-line-based manufacturing performance measurement", International Journal Production Economics 112, pp.380-390, Elsevier, 2008
- [38] L.L.Koste, M.K.Malhotra, S.Sharma, "Measuring dimensions of manufacturing flexibility", Journal of Operations Management, n.22, pp.171-196, Elsevier, 2004
- [39] G.Gonzales Gillis, H.A.ElMaraghy, W.H.ElMaraghy, "Evaluation of Machining Systems from a complexity and cost perspective", Proceedings of the 2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, Toronto, Canada, 21-23 September 2008

- [40] G.Barbiroli, “New indicators for measuring the manifold aspects of technical and economic efficiency of production processes and technologies”, *Technovation*, 16(7), pp.341-356, Elsevier, 1996
- [41] G.Barbiroli, “Indicators for Measuring the Global Performance and Value of Innovations”, *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol.60, pp.197-210, 2001
- [42] B.R.Donini, G.Barbiroli, “Measuring and optimizing the input technical effectiveness and efficiency of production processes by means of the linear programming method”, *Technovation*, vol.17, n.11-12, pp.667-674, Elsevier, 1997

3. Innovazione e complessità

- [43] O.Kuzgunkaya, H.A. ElMaraghy, “Assessing the structural complexity of manufacturing systems configurations”, *International Journal Flexible Manufacturing Systems*, 18, pp.145-171, 2006
- [44] Oslo Manual , OCSE 2004
- [45] C.Cooper, “Technology and Innovation in the International Economy”, Ashgate Publication Company, 1994
- [46] G.Barbiroli, “Strategie di produzione e dinamica tecnologica”, Bulzoni Editore, Roma, 1998
- [47] F.Momigliano, “Economia industriale ed economica dell’impresa”, Il Mulino, Bologna, 1975
- [48] P.F.Chapman, “The Energy costs of Producing cooper and aluminium from primary sources”, *Metals and Materials*, n.2, pp.107-111, 1974
- [49] C.Freeman, “Measurement of output of research and experimental development: a review paper”. *Statistical Reports and Studies*, UNESCO, Paris, 16, 1969
- [50] J.Fagerberg, D.C. Mowery, R.R.Nelson, “Innovazione - Imprese, industrie, economie” edizione italiana dell’Oxford Handbook of Innovation, Carocci editore, 2007
- [51] J.Wonglimpiyarat “Does complexity affect the speed of innovation”, *Technovation* 25, pp.865-882, Elsevier, 2005
- [52] R. Chapman, P. Hyland “Complexity and learning behaviors in product innovation”, *Technovation* 24, pp.553-561, Elsevier, 2004
- [53] M.V.Tatikonda, S.R.Rosenthal, “Technology Novelty, Project Complexity, and Product Development Project Execution Success: A deeper look at task uncertainty in product innovation”, *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 47, n.1, February 2000
- [54] F. Damanpour, “Organizational complexity and Innovation: developing and testing multiple contingency models”, *Management Science*, vol.42, n.5, May 1996

[55] M.Hobday, "Product complexity, innovation and industrial organisation", Research Policy 26 pp.689-710, Elsevier, 1998

[56] W.W.Cooper, K.K.Sinha e R.S.Sullivan, "Accounting for complexity in costing high technology manufacturing", European Journal of Operational Research 85, pp.316-326, Elsevier, 1995

4. Trasferimento tecnologico e complessità

[57] K.Pavitt, L.Soete, "Innovative Activities and Export Shares: some international comparisons", Technical Innovation and British Economic Performance, England, 1978

[58] R.Vernon, "The technology factor in international trade", Columbia University Press, New York, USA, 1970

[59] D.Bennet, H.Zhao, "International technology transfer: perceptions and reality of quality and reliability" Journal of Manufacturing Technology Management vol.15, n.5, pp.410-415, Emerald Group Publishing Limited, 2004

[60] R.W.Teasley, J.Almeida, R.B.Robinson, "Managing Technology Transfer for value creation and competitive advantage: a contingency-based, information processing model", IEMC Conference 1996

[61] V.Padmanabhan, W.E.Souder, "A Brownian Motion Model for Technology Transfer: Application to a Machine Maintenance Expert System", Journal of Production and Innovation Management 11, pp.119-133, Elsevier Science, 1994

[62] C.J. McDonald, "Copy EXACTLY! A paradigm shift in Technology Transfer Method", IEEE Semi Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 1997

[63] T.Nishiyama, "Using a "Process Warehouse" Concept A practical method for successful Technology Transfer", OMRON Corporation, 2000

[64] V.Jayaraman, M.I. Bhatti, H.Saber, "Towards optimal testing of an hypothesis based on dynamic technology transfer model", Applied Mathematics and Computation 147, pp.115-129, Elsevier, 2004

[65] C.N.Madu, C.Lin, C.H.Kuei, "A goal compatibility model for Technology Transfers", Applied mathematics Lett. Vol.28, n.9, pp.91-103, 1998

5. La complessità tecnologica

[66] J. Peklenik, "Complexity and Emergence of work systems in manufacturing", CIRP Journal of Manufacturing System, vol.34, 2005

- [67] H.P. Wiendhal, P. Scholtissek “Management and control of complexity in manufacturing”, *Annals of the CIRP*, vol.43, 2, 1994
- [68] M. Lissack, “Of chaos and complexity: managerial insights from a new science”, *Management Decision*, 35/3, pp.205-118, MCB University Press, 1997
- [69] B. R.Meijer, “To manage or not to manage complexity”, *Proceedings of IEMC '98*, IEEE, 1998
- [70] H.P.Wiendhal e H.Scheffczyk, “ Simulation based analysis of complex production systems with methods of nonlinear dynamics” *Annals of the CIRP*, vol.48, 1, 1999
- [71] K.K.B.Hon, “Complexity and agility in manufacturing”, *The 7th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Guangzhou, China, November 28-30, 2000
- [72] V. Tang e V. Salminen, “Towards a theory of complicatedness: framework for complex systems analysis and design”, *13th International Conference on Engineering Design*, Glasgow, Scotland, August, 2001
- [73] C.E. Siemieniuch e M.A. Sinclair “On complexity, process ownership and organizational learning in manufacturing organizations, from an ergonomics perspective”, 2002
- [74] C.A.Rodriguez-Toro, S.J. Tate, G.E.M. Jared e K.G.Swift in “Complexity metrics for design (simplicity + simplicity = complexity), *Proc. Instn Mech.Engrs.*,vol.217, Part B: J. Engineering Manufacture, 2003

6. Intelligenza Artificiale

- [75] R.Teti, S.R.T. Kumara, “Intelligent Computing Methods for Manufacturing Systems”, *Annals of the CIRP*, 46, pp.629-652, 1997
- [76] C.B.Chapman, M.Pinfold, “Design engineering – a need to rethink the solution using knowledge based engineering”, *Knowledge-Based Systems* 12, pp.257-267, 1999
- [77] L.Monostori, J.Vancza, S.R.T.Kumara, “Agent-Based Systems for Manufacturing”, *Annals of the CIRP*, vol. 55/2, 2006
- [78] Antonella Giulia Pizzaleo, “Fuzzy Logic”, Castelvechi editore, 2004
- [79] M.Pighin, A.Marzona, “Sistemi informativi aziendali”, Pearson Education Italia, maggio 2005
- [80] C.Sartori, *Processi e Tecniche di Data Mining*, Università di Bologna, A.A. 2005/2006
- [81] A.Tharumarajah, A.J.Wells, L.Nemes, “Comparison of Emerging Manufacturing Concepts”, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, San Diego – CA, pp.325-331, 1998

[82] C. Christo, C. Cadeira, “Trends in Intelligent Manufacturing Systems”, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2007, 2007

[83] J.Mathews, “Organization Foundations of Intelligent Manufacturing Systems – the Holonic viewpoint”, Computer Integrated Manufacturing Systems, v8, n4, 237-243, 1995

7. Metodi di calcolo della complessità tecnologica di prodotto e di sistema produttivo

7.1 Metodo 1: complessità misurata a partire dalla raccolta di dati oggettivi all'interno dell'impresa

[84] S Ramani, R. Venkatraman “Complexity index as a base for a decision making whether to introduce NC or conventional machines”, International Journal of Production Economics”, 23, pp.187-196, 1991

[85] W.C.Benton, R.Srivastava, “Product structure complexity and inventory storage capacity on the performance of a multi-level manufacturing system”, International Journal Prod. Res., vol.31, n11, pp.2531-2545, 1993

[86] J. Sarkis, “An empirical analysis of productivity and complexity for flexible manufacturing systems”, Int. J.Production Economics 48, pp.39-48, 1997

[87] V.D.R.Guide, JR., R.Srivastava, M.E.Kraus, “Product structure complexity and scheduling of operations in recoverable manufacturing” , vol. 35, n.11, pp 3179-3199, 1997

7.2 Metodo 2: complessità definita attraverso interviste a operatori aziendali

[88] M.H.Meyer, K.F.Curley, “The impact of knowledge and technology complexity on information systems development”, Expert Systems with applications, vol.8, n.1, pp.111-134, Elsevier Science, 1995

[89] I.Barclay, Z.Dann, “New-product development performance evaluation: a product-complexity-based methodology”, IEEE Proceedings, Proc.-Sci.Meas.Technol. vol.147,n.2, 2000

[90] S.Novak, S.D.Eppinger “Sourcing by design: product complexity and the supply chain”, Management Science, vol.47, n.1,pp.189-204, January 2001

[91] A.M.Sanchez, M.P.Perez, “Flexibility in new product development: a survey of practices and its relationships with the product’s technological complexity”, Technovation 23, pp.139-145, Elsevier Science, 2003

[92] R. Chapman, P. Hyland, “Complexity and learning behaviors in product innovation”, Technovation 24, pp.553-561, Elsevier Science, 2004

[93] Y.Li, L. Li, Y. Liu, L. Wang, "Linking management control system with product development and process decisions to cope with environment complexity", International Journal of Production Research, vol.43, n.12, pp.2577-2591, Taylor & Francis, 2005

[94] Z. Zhang, Q. Luo, "A grey measurement of Product Complexity", International Engineering Management Conference Singapore, December, 2007

7.3 Metodo 3: complessità calcolata attraverso l'uso di un sistema esperto

[95] F.Vidossich, "Analyse de complexité technologique", report for United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), 1982

[96] F.Vidossich "Cenário 2000 para a Indústria eletro-mecânica brasileira". São Paulo, Sindimaq. 1989.

[97] F.Vidossich, "A Modernização da empresa vista como um sistema: O paradigma da competitividade". 1991.

7.4 Modello entropico

[98] M. W.Golay, P. H.Seong, V. P.Manno "A measure of the difficulty of system diagnosis and its relationship to complexity", Int. J.General Systems, vol.16, pp.1-23, Gordon and Breach, Science Publishers, 1989

[99] A. V.Deshmukh, J. J.Tavalage, M. M. Barash in "Characteristics of part mix complexity measure for manufacturing systems", IEEE, 1992

[100] G.Frizelle, E Woodcock in "Measuring complexity as an aid to developing operational strategy", International Journal of Operations & Production Management, vol.15, n.5, pp.26-39, University Press, 1995

[101] A. V.Deshmukh, J. J.Tavalage, M. M. Barash, "Complexity in manufacturing systems, Part 1: Analysis of static complexity", IIE, Transactions 30, pp. 645-655, 1998

[102] SB.Yu, J.Efstathiou, "Complexity in rework cells: theory, analysis and comparison", Journal of the Operational Research Society 57, pp.593-602, 2006

[103] S.Sivadasan, J.Efstathiou, A Calinescu e L.Huaccho Huatuco, "Advances on measuring the operational complexity of supplier-customer systems", European Journal of Operational Research 171, pp.208-226, 2006

7.5 Metodologie ibride

[104] W.W. Cooper, K.K. Sinha, R.S. Sullivan "Measuring complexity in High Technology Manufacturing: Indexes for Evaluation" 1992

- [105] J.P.MacDuffie, K.Sethuraman, M.L.Fisher, “Product variety and manufacturing performance: evidence from the international automotive assembly plant study”, *Management Science*, vol.42, n.3, March 1996
- [106] M. Perona, G. Migliarotta, “Complexity management and supply chain performance assessment. A field study and a conceptual framework”, *Int. Journal Production Economics*, 90, pp.103-115, 2004
- [107] S.Sivadasan, J Efstathiou, G.Frizelle, R.Shirazi, A.Calinescu, “An information-theoretic methodology for measuring the operational complexity of supplier-customer systems”, *International Journal of Operations & Production Management*, vol.22, n.1, pp.80-102, 2002
- [108] J. Efstathiou, A. Calinescu, G. Blackburn, “A web-based expert system to assess the complexity of manufacturing organizations”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 18, pp.305-311, 2002
- [109] A.Grobler, A.Grubner, P.M.Milling, “Organisational adaptation processes to external complexity”, *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 26, n.3, pp.254-281, Emerald Group Publishing Limited, 2006

7.6 Il metodo ibrido dei Prof. ElMaraghy e Urbanic

- [110] W.H. ElMaraghy, Urbanic R.J., “Modelling of manufacturing system complexity”, *Annals of the CIRP*, vol.52, n.1, pp.363-366, 2003
- [111] W.H. ElMaraghy, Urbanic R.J., “Assessment of Manufacturing Operational Complexity”, *Annals of the CIRP*, vol.53, n.1, 2004
- [112] W.H. ElMaraghy, O. Kuzgunkaya, R.J. Urbanic, “Manufacturing System Configuration Complexity”, *Annals of the CIRP*, vol.54, n.1, 2005
- [113] H.A.ElMaraghy, “A complexity code for the manufacturing systems”, *Proceedings of ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering*, October 8-11, 2006, Ypsilanti, USA
- [114] A.M.A.Youssef, H.A.ElMaraghy, “Assesment of manufacturing systems reconfiguration smoothness”, *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 30, pp.174-193, 2006

8. Complessità nel design

8.1.1 Definizioni e contributi vari

- [115] D. Baccarini “The concept of project complexity – a review”, *International Journal of Project Management*, n. 14, n.4, pp.201-204, Elsevier Science, 1996

- [116] T.M. Williams, “The need for new paradigms for complex projects”, International Journal of Project Management, n. 17, n.5, pp.269-273 Elsevier Science, 1999
- [117] J.D Thomson, “Organizations in Action”, McGraw-Hill, New York, 1967
- [118] R.E. Jones, R.F.F Deckro, “The social psychology of project management conflict”, European Journal of Operational Research, n.64, pp.216-228, 1993
- [119] J.R. Turner, R.A. Cochrane, “Goals-and-methods matrix: coping with projects with ill defined goals and/or methods of achieving them”, International Journal of Project Management, n. 11, pp.93-102 Elsevier Science, 1993
- [120] G.Schuh, “Release Engineering – An approach to control rising system-complexity”, Annals of the CIRP, 2004

8.1.2 La teoria del Design Assiomatico e i diversi tipi di complessità

- [121] N.P. Suh, “Complexity in Engineering”, Annals of the CIRP, vol. 54/2, Elsevier, 2005
- [122] N.P. Suh, “Complexity theory and applications”, Oxford University Press, New York, 2005
- [123] N.P.Suh, “Theory of complexity, periodicity and the design axioms. Research in Engineering Design-Theory, applications, and concurrent engineering, vol.11, n.2, pp.116-131, 1999
- [124] N.P. Suh, “The principles of design”, Oxford University Press, New York, 1990
- [125] M.D. Guenov in “Complexity and Cost Effectiveness Measures for Systems Design”, Cranfield University Publications, 2002
- [126] K.H.Ko, C.Yu, K.Pochiraju, S. Manoochchri, “Analysis of information complexity during product development” proceedings of IDETC/CIE 2005, ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference September 24-28, 2005, Long Beach, USA

8.1.3 La complessità nel design vista dal Prof. ElMaraghy & c.

- [127] T.Tomiyama, V.D’Amelio, J.Urbancic, W.H.ElMaraghy, “Complexity of Multi-Disciplinary Design”, Annals of the CIRP, vol. 56/1, Elsevier, 2007
- [128] S.Shokri, W.H.ElMaraghy, “Reduced combinatorial complexity: a new approach to assess the assembly complexity” Proceedings of the 2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, Toronto, Canada, 21-23 September 2008

8.2 Complessità nell’assemblaggio

8.2.1 Definizioni e contribute vari

- [129] H.A. ElMaraghy, S.N.Samy, “Effect of Variety on Assembly Complexity”, Proceedings of the 2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, Toronto, Canada, 21-23 September 2008
- [130] M.Goldwasser, J.C. Latombe, R. Motwani, “Complexity measures for assembly sequences”, proceedings of the April 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, USA, 1996
- [131] C. Ramos, J. Rocha, Z. Vale “On the complexity of precedence graphs for assembly and task manufacturing”, Computers in Industry, 36, pp.101-111, Elsevier, 1998
- [132] C.Rodriguez-Toro, S.Tate, G.Jared, K.Swift, “Shaping the complexity of a design”, proceedings of IMECE2002, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, New Orleans, USA, November 17-22, 2002
- [133] G.Boothroyd, P Dewhurst, W.Knight, “Product design for manufacturing and assembly” CRC Press, 2002
- [134] C.J.Barnes, G.E.M.Jared, K.G.Swift, “A pragmatic approach to interactive assembly sequence evaluation”, Proc. Instn. Mech. Engrs. vol.217, part B, 2003
- [135] Design for Manufacture and Assembly Practicioners Manual, version 10, 1993, Lucas Engineering Systems Limited, University of Hull, Hull, 1993
- [136] H.Shibata, B.Cheldelin, K.Ishii, “Assembly quality methodology: a new method for evaluating assembly complexity in globally distributed manufacturing“, proceedings of IMECE2002, ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Washington, USA, November, 2003
- [137] T. Blecker e N. Abdelkafi, “Modularity and delayed product differentiation in assemble-to-order systems: analysis and extensions from a complexity perspective”, Proceedings of the International Mass Customization Meeting IMCM’05, Klagenfurt, Austria, 2005
- [138] T.Zhang e J.Efstathiou “The complexity of mass customization systems under different inventory strategies”, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol.19, n.5, pp.423-433, July-August, 2006
- [139] Xiaowei Zhu, S Jack Hu, Yoram Koren, Samuel P. Marin in “Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines”, proceedings of MSEC2006 ASME, International Conference on Manufacturing Science and Engineering, 8-11 October, Ypsilanti, USA, 2006
- [140] S.J.Hu, X.Zhu, H.Wang, Y.Koren “Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains”, CIRP Annals, Manufacturing Technology 57, pp.45-48, 2008.

8.2.2 Recenti proposte sulla complessità di assemblaggio dei Prof. ElMaraghy & c.

- [141] Y.-S.Kim, “A system complexity approach for the integration of product development and production systems design”, Msc.thesis, MIT, USA, 1999
- [142] S.Shokri, W.H.ElMaraghy, “A manufacturing complexity model of manual assembly”, Proceedings of the 2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, Toronto, Canada, 21-23 September 2008

9. Considerazioni per l’elaborazione del nuovo metodo

9.1 Metodologie a confronto

- [143] O.Kuzgunkaya, H.A.ElMaraghy, “Dynamic Complexity of Manufacturing Systems”, Proceedings of the 2nd CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems, Toronto, Canada, 21-23 September 2008
- [144] G.Vieira, JF.Hermann, E.Lin, “Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies, and methods” Journal of scheduling, 6/1, pp.39-62, 2003

11. Questionario per il calcolo dell’indice di complessità di prodotto

11.1 Criteri per la stesura di un buon questionario

- [145] N.E.Synodinos, “The “art” of questionnaire construction: some important considerations for the manufacturing studies”, Integrated Manufacturing System, 14/3, pp.221-237, 2003
- [146] D.Barnes, F.Rowbotham, “Developing a questionnaire for the four-stage model of operations strategy”, Production Planning and Control, vol.14,n.7,October-November, pp.613-622, 2003
- [147] D.Barnes, F.Rowbotham, “Testing the four-stage model of the strategic role of operations in a UK context”, International Journal of Operations & Production Management, vol.24, n.7, Emerald, 2004
- [148] F.E.Rowbotham, D.Barnes, “A questionnaire operationalising Hayes and Wheelwright’s four-stage concept”, Journal of Manufacturing Technology Management, vol.15, n.7, pp.651-661, Emerald, 2004
- [149] S.C.Wheelwright, R.H. Hayes, “Competing through manufacturing”, Harvard Business Review, January-February, pp.99-109, 1985

14. Proseguo della ricerca

- [150] H.C.Lee, W.Chul Jhee, H.-S. Park, “Generative CAPP Trough projective feature recognition”, *Computer & Industrial Engineering* 53, pp.241-246, 2007
- [151] J-W.Choi, D.Kelly, J.Raju, “A knowledge-based engineering tool to estimate cost and weight of composite aerospace structures at the conceptual stage of the design process”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 79/5, pp.459-468, Emerald, 2007
- [152] C.B.Chapman, M.Pinfeld, “Design engineering – a need to rethink the solution using knowledge based engineering”, *Knowledge-Based Systems* 12, pp.257-267, 1999
- [153] J.Kulon, P.Broomhead, D.J.Mynors, “Applying knowledge-based engineering to traditional manufacturing design”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 30, pp.945-951, Springer-Verlag, 2006
- [154] P.J.Lovett, A.Ingram, C.N.Bancroft, “Knowledge-based engineering for SMEs - a methodology”, *Journal of Materials Processing Technology* 107, pp.384-389, Elsevier, 2000
- [155] J.A.Penoyer, G.Burnett, D.J.Fawcett, S.-Y.Liou, “Knowledge based product life cycle systems: principles of integration of KBE and C3P”, *Computer-Aided Design* 32, pp.311-320, Elsevier, 2000

ALLEGATO D

- [156] S.Loughlin, “A holistic approach to Overall Equipment Effectiveness” *IEE Computing and Control Engineering*, December/January 2003/2004

ALLEGATO G

- [157] R. Likert, “Technique for the misure of attitudes” *Arch.Psycho*, Vol. 22, n. 140, 1932.
- [158] L. Cronbach, “Coefficient alpha and the internal structure of tests”, *Psychometrica* 16, pp.297-334, 1951
- [159] A.Leontitsis, J.Pagge, “A simulation approach on Cronbach’s alpha statistical significance”, *Mathematics and Computers in simulation* 73, pp.336-340, Elsevier, 2007
- [160] N.Schmitt, “Uses and abuses of coefficient Alpha”, *Psychological Assessment* vol.8, n.4, pp.350-353, 1996

ALLEGATO H

- [161] R Clausius, “Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie” (Trattato sulla teoria meccanica del calore), Braunschweig, Druck und Verlag Von Friedrich Vieweg und Sohn, 1867
- [162] C.E. Shannon, "A Mathematical Theory of Communication", *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423, 623-656, July, October, 1948

ALLEGATO L

[163] S.Z.Qamar, A.F.M. Arif, A.K.Sheikh, “A new definition of shape complexity for metal extrusion”, Journal of Materials Processing Technology, vol.155-156, pp.1734-1739, November 2004

[164] K.Laue, H Stenger, “Extrusion, Processes, Machinery, Tooling” American Society for Metals, pp.132-134, 1981

[165] S.K.Padhy, R.Sharan, S.N.Dwivedi, “Feature based approach for casting design”, Proceedings of the 2nd International conference on Design Theory and Methodology, Chicago, Illinois, USA, Methodology DTM '90, vol.27,pp.113-118, ASME September 1990

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare per primo il Prof. Giovanni Tani che mi ha permesso di svolgere questo dottorato di ricerca che ha significato per me una forte crescita professionale e in generale una esperienza personale impegnativa ma di grande soddisfazione. Ringrazio inoltre il Prof. Alessandro Freddi, senza il quale non mi troverei oggi nel mondo della ricerca universitaria, e il Prof. Sergio Curioni insieme a tutti i colleghi del gruppo di ricerca sulle tecnologie produttive Prof. Luca Tomesani, Ing. Leonardo Orazi, Ing. Giampaolo Campana, Ing. Lorenzo Donati, Ing. Alessandro Fortunato, Ing. Claudio Mantega, Ing. Alessandro Ascari, Ing. Giacomo Bertuzzi e più in generale del dipartimento DIEM, in particolare l'Ing. Cristiano Fragassa, il Dr. Roberto Martelli e il Sig. Maurizio Guidoboni che mi hanno sempre dimostrato disponibilità quando ne ho avuto bisogno.

Ringrazio inoltre il Prof. Anibal Cofone, che mi ha gentilmente ospitato per un periodo di studio e ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'ITBA (Istituto Tecnologico de Buenos Aires) di cui è Direttore, e il Prof. Claudio Sartori del Dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica DEIS dell'Università di Bologna.

Ringrazio infine tutti coloro che, pur non appartenendo al mio ambiente professionale, hanno compreso il mio lavoro e avuto la pazienza di starmi vicino in questi intensi tre anni.

INDICE

Abstract	1
COMPLESSITA' TECNOLOGICA, TRASFERIMENTO TECNOLOGICO E INNOVAZIONE	
1. Introduzione:	4
1.1 Il tema della complessità	4
1.2 La complessità tecnologica	7
1.3 Significato e applicazioni della complessità	8
2. Indicatori:	12
2.1 Relazioni tra indicatori e complessità in ambito industriale	12
2.2 Definizioni e proprietà degli indicatori	13
2.3 Storia degli indicatori di processo	16
2.4 Problema della sintesi e aggregazione degli indicatori	18
2.5 Proprietà e individuazione di indicatori	22
2.6 Valutazione delle prestazioni produttive	25
2.6.1 Definizioni e TPM	25
2.6.2 OEE	28
2.6.2 Indicatori derivati dall'OEE	31
2.7 Elenco dei principali indicatori di produzione e loro utilizzo	34
3. Innovazione e complessità:	41
3.1 Innovazione: definizione e fattori determinanti	41
3.2 Indicatori dell'innovazione tecnologica	42
3.3 Diffusione e velocità dell'innovazione in relazione alla complessità	44
3.4 Introduzione di innovazione e complessità	47
4. Trasferimento tecnologico e complessità	55
4.1 Internazionalizzazione e trasferimento tecnologico	55
4.2 Modelli di trasferimento tecnologico	57
4.3 Utilizzo della complessità nei trasferimenti di tecnologia	62
5. La complessità tecnologica	64
5.1 L'approccio alla complessità	64

5.2	Tipologie di complessità	69
5.3	Definizioni qualitative di complessità	72
5.4	Stato dell'arte della ricerca scientifica sulla complessità e classificazione dei metodi di calcolo	81
6.	L'intelligenza artificiale come possibile strumento di calcolo della complessità	84
6.1	L'Intelligenza Artificiale	84
6.2	Metodi computazionali intelligenti nella produzione	86
6.3	Architetture IA di sistemi produttivi	96
7.	Metodi di calcolo della complessità tecnologica di prodotto e di sistema produttivo	103
7.1.	Metodo 1: complessità misurata a partire dalla raccolta di dati oggettivi all'interno dell'impresa	103
7.2	Metodo 2: complessità definita attraverso interviste agli operatori aziendali	118
7.3	Metodo 3: complessità calcolata attraverso l'uso di un sistema esperto	137
	7.3.1 Il sistema ACT	138
	7.3.2. L'analisi strutturale	151
7.4	Metodo 4: complessità calcolata attraverso il modello entropico	158
7.5	Metodo 5: complessità calcolata con metodologie ibride	184
7.6.	Il metodo ibrido dei Prof. ElMaraghy, Urbanic	211
8.	La complessità nelle fasi di progettazione e assemblaggio	247
8.1	Complessità nel design	247
	8.1.1 Definizioni e contributi vari	247
	8.1.2 La teoria del Design Assiomatico e i diversi tipi di complessità	250
	8.1.3 La complessità nel design vista dal Prof. ElMaraghy & c.	267
8.2	Complessità di assemblaggio	273
	8.2.1 Definizioni e contributi vari	273
	8.2.2 Recenti proposte sulla complessità di assemblaggio del Prof. ElMaraghy & c.	300
9.	Considerazioni per l'elaborazione del nuovo metodo	307
	9.1.1 Metodologie a confronto	307

9.1.2	Scelte per il nuovo metodo	314
10.	Elaborazione di una nuova metodologia su base entropica di calcolo dell'indice di complessità di prodotto	317
10.1	Fattori oggettivi di valutazione della complessità di fabbricazione	317
10.2	Metodo di calcolo	322
10.3	Conclusioni relative alla nuova metodologia su base entropica	330
11.	Questionario per il calcolo dell'indice di complessità di prodotto	331
11.1	Criteri per la stesura di un buon questionario	331
11.2	Testo del questionario	332
11.3	Metodologia di elaborazione dei risultati del questionario	338
12.	Verifica sperimentale delle metodologie proposte	346
12.1	Descrizione dell'azienda	346
12.2	Descrizione dei pezzi su cui si sono sperimentate le metodologie e dei loro cicli di lavoro	347
12.3	Modalità con cui sono stati rilevati i dati	356
12.4	Analisi e confronto dei risultati	360
12.5	Conclusioni sulla verifica sperimentale	361
13.	Conclusioni	362
14.	Proseguo della ricerca	363
ALLEGATI		
A.	Esempio di calcolo OEE	367
B.	Caso aziendale calcolo OEE	369
C.	Elenco completo di definizioni e formule degli indicatori di prestazione produttiva	390
D.	Calcolo OEE tramite metodi di Intelligenza Artificiale	391
E.	Casi aziendali di trasferimento di tecnologia	394
F.	Sistemi produttivi	406
G.	Elaborazione e valutazione di questionari: tecnica Likert, fattore Alfa di Cronbach, metodo Delphi	410
H.	Entropia e teorema di Shannon	414

I.	Esempio applicazione metodologia ElMaraghy-Urbanic di calcolo dell'indice di complessità di prodotto	416
L.	Considerazioni sulla complessità di processo primario	421
M.	Fogli Excel utilizzati per il calcolo degli indici di complessità della verifica sperimentale	426
N.	Questionari relativi ai quattro pezzi testati e fogli Excel di elaborazione degli indici	436
	Glossario	455
	Bibliografia	457