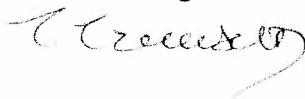


DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA NUCLEARE  
- XIV ciclo -

Coordinatore: Prof. Ing. Tullio Trombetti



INGEGNERIA  
DI  
MANUTENZIONE

Autore: Dott. Ing. Piero Morelli



Tutore: Prof. Ing. Francesco Cesari

# UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA

Dottorato di Ricerca in Ingegneria Nucleare – XIV ciclo

Verbale della riunione del Collegio dei Docenti del 6/12/2001 - Allegato n. 2.1

---

## Presentazione del Collegio dei Docenti da allegare alla tesi del *Dottorando ing. Piero Morelli*

**Curriculum n.2: Meccanica strutturale, affidabilità e garanzia della qualità**  
**Tesi: "Ingegneria di manutenzione".**

### Conoscenze e competenze acquisite

Nel corso dei propri studi di Dottorato di ricerca, l'Ing. Morelli ha acquisito conoscenze nell'ambito dell'analisi di affidabilità e sicurezza di sistemi e impianti, sviluppando le proprie competenze specifiche nella soluzione delle problematiche connesse alla manutenzione degli stessi.

### Obiettivo della tesi e problematica di ricerca affrontata

Il lavoro di ricerca svolto durante il periodo di Dottorato, ed oggetto della tesi, si propone di fornire una metodologia di pianificazione della manutenzione, volta a garantire i necessari requisiti di affidabilità e sicurezza nel tempo, massimizzando l'efficacia e l'efficienza del sistema. Il problema principale è infatti legato alla difficoltà nel pianificare una corretta allocazione delle risorse manutentive (ricambi e personale di servizio), con l'intento di favorire la sicurezza, migliorare la produttività e ridurre i costi di esercizio.

### **Sviluppo temporale delle attività e principali temi di ricerca affrontati**

Il problema descritto, che può essere risolto con modelli analitici per casi molto semplici nell'ambito della teoria dei processi stocastici di rinnovo o, al limite rigenerativi, è stato affrontato dall'Ing. Morelli per via numerica introducendo una metodologia d'analisi basata sulla simulazione Monte Carlo della vita dei sistemi.

Il percorso di ricerca è stato articolato secondo fasi successive, partendo dall'approfondimento dello studio dei modelli di affidabilità e manutenibilità dei sistemi riparabili, e indirizzandosi alla messa a punto del codice di simulazione **RAMSES** (acronimo per *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Engineering Software*), per quanto riguarda sia la tecnica di calcolo dell'affidabilità che la gestione degli interventi di manutenzione.

L'Ing. Morelli si è poi occupato del problema dell'analisi dei dati di guasto, collaborando con l'Ing. Zucchelli, anch'esso dottorando del XIV ciclo, sulla soluzione di casi proposti da FIAT e MARELLI. Nel prosieguo dell'attività di ricerca ha inoltre approfondito il problema legato all'incertezza dei dati e agli effetti che tale incertezza provoca nei risultati delle simulazioni numeriche.

Un ulteriore sviluppo della ricerca riguarda l'integrazione che è stata effettuata fra la simulazione Monte Carlo ed il processo decisionale tipico della RCM (*Reliability Centered Maintenance*). Al proposito è stata sperimentata la possibilità di valutare numericamente il valore ottimo degli intervalli di intervento manutentivi, a seguito della corretta individuazione delle attività grazie alle linee guida del diagramma decisionale messo a punto da J. Moubray nella RCM II.

A conclusione del percorso di studi di dottorato, l'Ingegnere si è interessato delle possibili applicazioni del DOE (*Progetto dell'Esperimento*) al caso della simulazione numerica, valutando la

capacità del metodo di individuare la politica manutentiva ottima ed i fattori dominanti, grazie all'esecuzione di un piano frazionato di simulazioni.

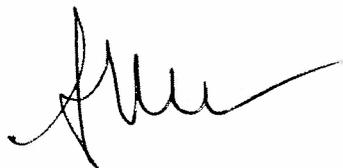
Come attività di minore rilievo, il dottorando, in collaborazione con i ricercatori del DIEM, si è dedicato al progetto e all'esecuzione di prove sperimentali di caratterizzazione e di fatica oligociclica per provini in materiale composito; a misure del danno progressivo in provini di alluminio soggetti a cicli di carico in campo di deformazione plastica; allo sviluppo e all'esecuzione di analisi di tipo affidabilistico per casi di interesse industriale volte alla definizione di alberi di guasto e analisi FMECA.

#### Valutazione riassuntiva

Nel corso dei tre anni di studio di Dottorato di ricerca, l'Ing. Morelli ha sviluppato una profonda competenza nell'analisi di problemi legati alle valutazioni di affidabilità e sicurezza dei sistemi, introducendo un contributo personale soprattutto nell'ambito della corretta pianificazione della manutenzione e nello studio del ciclo di vita dei prodotti. In particolare ha messo in pratica gli studi effettuati nella soluzione di casi di interesse industriale, dimostrando l'efficacia dei modelli di calcolo sviluppati autonomamente e valutandone i limiti. Pertanto appare ora in grado di fornire apporti personali alla ricerca nel settore, sia in maniera autonoma, sia validamente integrata in gruppi di ricerca avanzati.

#### P. Morelli --- lista delle pubblicazioni

- [1] P. Morelli, "La simulazione numerica nel management della manutenzione", rivista Italiana Manutenzione Tecnica e Management, anno 7 n°10, ottobre 2000 pagg 37 - 44
- [2] P. Morelli, "Trattamento delle incertezze nella RCM", rivista Italiana "Manutenzione, Tecnica e Management", anno 8 n°9, settembre 2001 pagg 53 - 58
- [3] P. Morelli, "La simulazione numerica per l'analisi affidabilistica della manutenzione dei sistemi meccanici", rivista Italiana "Macchine Utensili", anno 22 n°8 pagg 172 180
- [4] P. Morelli "RCM Simulation in the Automotive Design", atti del convegno internazionale ATA 2001, Firenze, 22 - 25 maggio 2001. Pubblicazione in CD-ROM
- [5] P. Morelli, G. Minak, "Cost Oriented Maintenance Optimisation by a new RCM code", atti della XIV conferenza internazionale sulla manutenzione Euromaintenance'98, 8-10 ottobre 1998, Dubrovnik (Croazia)
- [6] P. Morelli, G. Minak, "Failure Data Uncertainties in the RCM Approach", atti della XV conferenza internazionale sulla manutenzione Euromaintenance2000, 6-10 marzo 2000, Gotheborg (Svezia) pagg. 237-244
- [7] P. Morelli, A. Zucchelli, G. Minak, "Analisi di Affidabilità di un Servomeccanismo Idraulico per Applicazione Automobilistica", atti del XXIX convegno nazionale AIAS- Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni, 6-9 settembre 2000, Lucca (Italia)
- [8] L. Orazi, G. Minak, P. Morelli, "Design of Tension Compression Grips for CFRP Specimens", atti del III congresso internazionale della società croata di meccanica, 28-30 settembre 2000, Dubrovnik (Croazia)
- [9] L. Orazi, G. Minak, P. Morelli, "Residual Stresses and Residual Strength Analysis on High Pressure Scuba Cylinders", atti del XVII simposio Danubia-Adria sui metodi sperimentali della meccanica dei solidi, 11-14 ottobre, Praga (Repubblica Ceca)
- [10] L. Orazi, G. Minak, P. Morelli, "A Damage Detection Method for Unidirectional CFRP Based on Electrical Resistance", atti del XVII simposio Danubia-Adria sui metodi sperimentali della meccanica dei solidi, 11-14 ottobre, Praga (Repubblica Ceca)
- [11] G. Minak, L. Orazi, P. Morelli, "Parameter Determination for a Low Cycle Fatigue Model for AA 6351 Aluminum", atti del convegno internazionale EUROMAT 2001, 10 - 14 giugno 2001
- [12] F. Ghezzi, G. Minak, L. Orazi, P. Morelli, "Determinazione dei parametri caratteristici di un modello termodinamico per la simulazione del comportamento a fatica a basso numero di cicli della lega di alluminio AA 6351", atti del XXX convegno nazionale AIAS, settembre 2001



## **DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA NUCLEARE**

### **Estratto di verbale della riunione del Collegio dei docenti del 6/12/2001**

Il giorno 6 del mese di dicembre 2001 in Bologna, alle ore 15:30, presso la sala di riunione del Dipartimento DIEM, Facoltà di Ingegneria, si è riunito il Collegio dei docenti del corso di Dottorato di ricerca in Ingegneria Nucleare. Sono presenti i professori: Molinari, Lorenzini, Curioni, Trombetti,, Cesari Francesco (DIEM), Dal Re, Premuda, .

Risultano assenti giustificati i professori: Sobrero .

Risultano assenti ingiustificati i professori: Cesari Franco G.(DIENCA), Orlandelli .

Presiede la seduta il coordinatore, Prof. Tullio Trombetti. Assume le funzioni di segretario il Prof. Curioni

Sono presenti i dottorandi:

Premuda Margherita, Morelli Piero, Zucchelli Andrea (terminano il 3<sup>^</sup> anno XIV ciclo);

Bazzotti Andrea, Biserni Cesare, Gombia Mirko, Rocchi Federico (terminano il 2<sup>^</sup> anno XV ciclo).

Il Presidente riconosce valida la seduta e la dichiara aperta per trattare - come dall'avviso di convocazione - il seguente ordine del giorno:

1. Comunicazioni.
2. Presentazione dottorandi XIV ciclo da allegare alla dissertazione finale.
3. Valutazione annuale dell'attività degli iscritti al XV ciclo e ammissione all'anno di corso successivo.
4. Programmazione annuale dell'attività di ricerca - ciclo XV.
5. Periodo di formazione all'estero o equiparato.
6. Autorizzazioni varie (titolari di assegni di ricerca, collaborazioni ad attività didattiche, partecipazione a ricerche finanziate con fondi diversi ...)
7. Varie ed eventuali.

#### **1) Comunicazioni.**

L'Ufficio Dottorato specifica che le iscrizioni al 3<sup>^</sup> anno del XV ciclo dovranno essere presentate entro il 21/12/2001.

## **2. Presentazione dottorandi da allegare alla dissertazione finale.**

Il coordinatore comunica che i tutori degli allievi iscritti per l'anno accademico 2000/2001 all'ultimo anno di corso (XIV ciclo) hanno provveduto a presentare le proposte di "presentazione" che illustrano l'attività svolta e i risultati ottenuti da ciascun allievo nel dottorato, e che sono a disposizione del Collegio:

Morelli Dr. Piero  
Premuda Dr. Margherita,  
Zucchelli Dr. Andrea

Dà quindi la parola ai tutori ai fini dell'illustrazione di tali proposte e della discussione e approvazione da parte del Collegio. L'illustrazione viene svolta per il dottorando Morelli Dr. Piero dal Prof. Francesco Cesari, per il dottorando Premuda Dr. Margherita dal Prof. Vincenzo Molinari e per il dottorando Zucchelli Dr. Andrea dal Prof. Sergio Curioni.

Vengono sentiti i dottorandi in merito all'attività svolta nel corso di dottorato e ai risultati raggiunti. Segue ampia ed approfondita discussione.

Il collegio dei docenti delibera in merito all'approvazione delle "presentazioni" riportate negli Allegati n. 2.1, 2.2, 2.3 (parti integranti del presente verbale), che illustrano la personalità di ciascun dottorando e l'attività scientifico-formativa svolta durante il corso, mettendone in luce gli aspetti positivi o, eventualmente, negativi.

### **Dottorando: Morelli Dr. Piero.**

Curriculum seguito: n. 2 ("Meccanica Strutturale, Affidabilità e Garanzia di Qualità")

Tesi: **"Ingegneria di manutenzione"**.

Presentazione: Allegato 2.1

La proposta di presentazione del Dottorando Ing. Morelli è approvata all'unanimità.

Entra il Prof. Orlandelli e assume le funzioni di Segretario.

Esce il Prof. Premuda.

### **Dottorando: Premuda Dr. Margherita.**

Curriculum seguito: n. 1 (Tecnologie nucleari e fisica dei reattori avanzati)

Tesi: **"Scambi energetici nell'atmosfera e assorbimento molecolare di radiazione. Modellistica e codici di calcolo"**.

Presentazione: Allegato 2.2

La proposta di presentazione della Dottoranda dott.ssa Premuda è approvata all'unanimità.

Rientra il Prof Premuda.

### **Dottorando: Zucchelli Dr. Andrea.**

Curriculum seguito: n. 2 ("Meccanica Strutturale, Affidabilità e Garanzia di Qualità")

Tesi: **"Metodologie di calcolo dell'affidabilità dei sistemi meccanici"**.

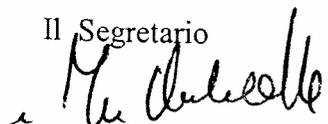
Presentazione: Allegato 2.3

La proposta di presentazione del Dottorando Ing. Zucchelli è approvata all'unanimità.

Il Collegio, dietro richiesta degli interessati, autorizza i dottorandi ad allegare alla tesi, in qualità di allegati, alcuni articoli in lingua inglese.

Il verbale fino a questo punto dell'OdG, redatto e letto seduta stante, è posto in votazione con il seguente esito: Favorevole .all'unanimità .

Il Segretario



Il Presidente



Si ringrazia l'ENEA, "Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente", per avere finanziato i tre anni di Dottorato di Ricerca, e si ringraziano vivamente l'Ing. M. Nani e l'Ing. A. Veraldi, per la loro sincera amicizia e la valida professionalità con cui hanno collaborato allo sviluppo di alcune applicazioni del tema di ricerca.

# INGEGNERIA DI MANUTENZIONE

Piero Morelli

gennaio 2002

a Cinzia e Alberto

# Indice

<b>Prefazione</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Ingegneria dei sistemi applicata alla manutenzione</b>	<b>3</b>
1.1 Definizione di componente . . . . .	3
1.2 Sistema e funzione di sistema . . . . .	6
1.3 Funzione di sistema: Affidabilità . . . . .	7
1.3.1 Affidabilità di un sistema monocomponente . . . . .	7
1.3.2 Rateo di guasto del componente . . . . .	8
1.3.3 Affidabilità di un sistema con più componenti . . . . .	10
1.3.4 Diagramma a blocchi di affidabilità — RBD . . . . .	10
1.4 Metodi di calcolo affidabilistico dei sistemi . . . . .	12
1.4.1 Strutture in serie . . . . .	12
1.4.2 Strutture in parallelo . . . . .	12
1.4.3 Conteggio delle parti . . . . .	13
1.4.4 Metodo dell'elemento chiave . . . . .	13
1.5 Disponibilità dei sistemi riparabili . . . . .	15
1.5.1 Disponibilità istantanea . . . . .	17
1.5.2 Disponibilità asintotica . . . . .	21
<b>2 RCM — Manutenzione mirata all'affidabilità</b>	<b>23</b>
2.1 Storia della manutenzione e stato dell'arte . . . . .	24
2.2 Ingegneria di manutenzione . . . . .	27
2.2.1 Manutenzione e manutenibilità . . . . .	27
2.2.2 Supporto logistico e ricambi . . . . .	28

2.2.3	Disponibilità . . . . .	28
2.2.4	Sicurezza, rischio e livello di accettazione del rischio . . . . .	29
2.3	Introduzione alla RCM . . . . .	30
2.3.1	Funzioni e standard di funzionamento . . . . .	31
2.3.2	Guasti funzionali . . . . .	32
2.3.3	Modi di guasto e cause di guasto . . . . .	32
2.3.4	Conseguenze dei guasti . . . . .	33
2.3.5	Risultati della RCM . . . . .	35
2.4	Strategie di manutenzione . . . . .	36
2.4.1	Manutenzione Correttiva . . . . .	36
2.4.2	Manutenzione Proattiva — Preventiva . . . . .	36
2.4.3	Manutenzione Proattiva — Predittiva . . . . .	40
2.4.4	Ricerca dei guasti nascosti . . . . .	43
2.4.5	Terotecnologia . . . . .	44
2.4.6	Riprogettazione . . . . .	45
2.5	Il processo decisionale . . . . .	46
2.5.1	Il diagramma decisionale . . . . .	46
2.5.2	Il personale addetto alle manutenzioni . . . . .	50
2.5.3	Le schede di manutenzione . . . . .	50
2.6	RCM — Applicazione al caso Mydrin Finley . . . . .	51
2.6.1	Presentazione dell'azienda . . . . .	51
2.6.2	Descrizione e schemi di impianto . . . . .	52
2.6.3	Analisi funzionale . . . . .	52
2.6.4	Risultati RCM . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Simulazione Monte Carlo applicata alla manutenzione</b>	<b>77</b>
3.1	Natura della simulazione numerica . . . . .	77
3.2	Modelli per la simulazione numerica . . . . .	79
3.3	Avanzamento temporale della missione . . . . .	81
3.4	Simulazioni distribuite . . . . .	82
3.4.1	Simulazione di automi cellulari . . . . .	83

3.5	Simulazione Monte Carlo . . . . .	84
3.5.1	Cenni storici sul metodo Monte Carlo . . . . .	84
3.5.2	Stima dell'errore . . . . .	86
3.5.3	Applicazione del Monte Carlo al calcolo della proba- bilità di fuga neutronica . . . . .	87
3.5.4	Calcolo del leakage con tecnica di splitting neutronico	90
<b>4</b>	<b>Il codice RAMSES</b>	<b>93</b>
4.1	Funzioni implementate . . . . .	93
4.2	Note sulla programmazione . . . . .	96
4.3	Struttura logica . . . . .	97
4.4	Organizzazione degli archivi dei dati . . . . .	99
4.4.1	Archivio dei componenti . . . . .	99
4.4.2	Archivio dei pezzi di ricambio — magazzino . . . . .	103
4.4.3	Archivio del personale — officina . . . . .	104
4.5	Impostazione di un progetto . . . . .	106
4.5.1	Controllo della simulazione . . . . .	106
4.5.2	Controllo di sistema . . . . .	109
4.5.3	Matrice di affidabilità di sistema . . . . .	109
4.5.4	Gestione delle dipendenze — stand by e propagazione dei guasti . . . . .	110
4.5.5	Condizioni di carico e ratei di guasto dei componenti .	112
4.5.6	Impostazione della politica di manutenzione . . . . .	115
4.6	Diagrammi dei risultati di simulazione . . . . .	121
4.6.1	Disponibilità del sistema . . . . .	121
4.6.2	Costo di esercizio . . . . .	122
4.6.3	Rischio di esercizio . . . . .	122
4.6.4	Disponibilità dei pezzi di ricambio . . . . .	125
4.6.5	Disponibilità della manodopera . . . . .	126
4.7	Strategie di simulazione . . . . .	128
4.7.1	Gestione del tempo e degli eventi . . . . .	128
4.7.2	Modello logico del sistema . . . . .	131

4.7.3	Modello della fisica del guasto . . . . .	134
4.7.4	Estrazione del tempo al guasto — teoria dell'età . . .	135
4.8	Strategie di manutenzione . . . . .	140
4.9	Limiti della simulazione numerica applicata alla manutenzione	144
<b>5</b>	<b>Applicazioni della simulazione di manutenzione</b>	<b>145</b>
5.1	Sistema di attuatori di potenza . . . . .	145
5.1.1	Analisi funzionale dell'impianto . . . . .	145
5.1.2	Diagramma a blocchi di affidabilità . . . . .	148
5.1.3	Fisica del guasto dei componenti . . . . .	150
5.1.4	Grafico di affidabilità . . . . .	152
5.1.5	Il problema della contaminazione . . . . .	152
5.1.6	Simulazione di risorse scarse e dei costi di esercizio . .	155
5.2	Ottimizzazione di un piano di manutenzione automobilistico .	157
5.2.1	Rateo di guasto del motore indotto dall'olio . . . . .	158
5.2.2	Simulazione della politica di manutenzione ottima . .	160
<b>6</b>	<b>Analisi dei guasti mediante MLE</b>	<b>165</b>
6.1	Il problema dell'analisi dei dati di guasto . . . . .	165
6.2	Principio di funzionamento del MLE . . . . .	166
6.3	Contributi MLE per il modello di guasto classico . . . . .	168
6.3.1	Tempi al guasto . . . . .	168
6.3.2	Dati di guasto censurati per intervalli . . . . .	168
6.3.3	Dati sospesi . . . . .	168
6.3.4	Esempio di applicazione del MLE — caso classico . . .	169
6.4	Contributi MLE per il modello di guasto con difettosità . . .	171
6.4.1	Tempi al guasto . . . . .	173
6.4.2	Dati di guasto censurati per intervalli . . . . .	173
6.4.3	Dati sospesi . . . . .	174
6.4.4	Esempio di applicazione del MLE con difettosità . . .	174
	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>179</b>

<b>A</b>	<b>Teoria della probabilità</b>	<b>181</b>
A.1	Definizioni . . . . .	181
A.1.1	Spazio campione, campo degli eventi, probabilità . . .	181
A.1.2	Probabilità condizionale ed indipendenza statistica . .	183
A.2	Teoremi sulla teoria della probabilità . . . . .	183
A.2.1	Addizione per eventi mutuamente escludentisi . . . . .	184
A.2.2	Moltiplicazione per due eventi indipendenti . . . . .	184
A.2.3	Moltiplicazione per due eventi arbitrari . . . . .	184
A.2.4	Addizione per eventi arbitrari . . . . .	184
A.2.5	Teorema della probabilità totale . . . . .	184
A.2.6	Legge dei grandi numeri . . . . .	185
A.2.7	Teorema del limite centrale . . . . .	185
A.3	Funzioni distribuzione di probabilità . . . . .	185
A.3.1	Esponenziale . . . . .	186
A.3.2	Weibull . . . . .	186
A.3.3	Gamma . . . . .	187
A.3.4	Normale . . . . .	188
A.3.5	Lognormale . . . . .	189
A.3.6	Uniforme . . . . .	189
A.3.7	Binomiale . . . . .	190
A.3.8	Poisson . . . . .	191
A.3.9	Geometrica . . . . .	191
<b>B</b>	<b>Generazione di variabili casuali</b>	<b>193</b>
B.1	Tecnica della trasformata inversa . . . . .	193
B.2	Tecnica della reiezione . . . . .	194
	<b>Bibliografia</b>	<b>197</b>



# Elenco delle figure

1.1	Rateo di guasto in funzione del tempo . . . . .	9
1.2	Esempio di diagramma a blocchi di affidabilità . . . . .	10
1.3	Esempio di un diagramma a blocchi di affidabilità a ponte . .	13
1.4	Diagramma a ponte semplificato nel caso (a) con $E_5$ funzio- nante e nel caso (b) con $E_5$ guasto . . . . .	14
1.5	Sequenza di eventi possibili per la $\mathcal{D}(t 1)$ . . . . .	18
1.6	Equivalenza dei processi stocastici (a) e (b), per la variabile aleatoria $z$ . . . . .	19
2.1	Matrice di eccellenza della manutenzione . . . . .	23
2.2	Evoluzione storica dei requisiti di manutenzione . . . . .	24
2.3	Scheda informativa RCM . . . . .	32
2.4	Tipologie del rateo di guasto in funzione del tempo . . . . .	38
2.5	Perturbazione di un sistema stabile . . . . .	39
2.6	Funzione densità di probabilità di guasto . . . . .	39
2.7	Condition monitoring, curva di evoluzione dei guasti potenziali	40
2.8	Frequenza delle ispezioni e intervallo $P \mapsto F$ netto . . . . .	41
2.9	Diagramma di decisione delle attività della RCM . . . . .	47
2.10	Scheda del piano di manutenzione RCM . . . . .	48
2.11	Schema funzionale della linea di produzione Mydrin . . . . .	53
2.12	Caldaia per olio diatermico . . . . .	54
2.13	Turbosfera . . . . .	55
2.14	Impianto di messa a vuoto . . . . .	56
2.15	Sistema tagliante . . . . .	57

2.16	Impianto acqua di raffreddamento e veicolazione del collante solidificato a granelli . . . . .	58
2.17	Sistema di raccolta dell'acqua . . . . .	59
2.18	Impianto di essiccazione del collante . . . . .	60
2.19	Impianto di refrigerazione dell'acqua nel circuito primario . . . . .	61
2.20	Sistema di aspirazione dei fumi e delle polveri . . . . .	61
3.1	Sperimentazione sul sistema . . . . .	78
3.2	Avanzamento temporale a passo fisso . . . . .	81
3.3	Avanzamento temporale mediante salto fra gli eventi . . . . .	82
3.4	Simulazione di biorisanamento dei suoli — Concentrazione di $Fe^{++}$ al giorno 1 e al giorno 60 . . . . .	84
3.5	Simulazione del volo di 10 neutroni . . . . .	90
3.6	Simulazione del volo di 1 neutrone con splitting neutronico . . . . .	91
4.1	Codice RAMSES — schermata iniziale . . . . .	97
4.2	Archivio dei componenti . . . . .	99
4.3	Schema di un impianto di pompaggio costituito da due pompe A e B in parallelo e da un insieme di centraline di controllo . . . . .	100
4.4	Formato delle schede nell'archivio dei pezzi di ricambio . . . . .	103
4.5	Formato delle schede nell'archivio del personale . . . . .	105
4.6	Interfaccia del main . . . . .	106
4.7	Effetto della risoluzione di calcolo utilizzata: per ottenere un profilo continuo occorre utilizzare un passo molto fine . . . . .	107
4.8	Esempio di un controllo di sistema . . . . .	109
4.9	Rappresentazione della funzione di affidabilità tramite RBD e relativa matrice . . . . .	110
4.10	Interfaccia di controllo delle dipendenze — catene incidentali e ridondanze passive . . . . .	111
4.11	Diagrammi del rateo di guasto per intensità del carico crescente	112
4.12	Interfaccia di predisposizione delle condizioni di carico e dei ratei di guasto dei componenti . . . . .	114
4.13	Interfaccia di predisposizione della politica di manutenzione . . . . .	116

4.14	Interfaccia di predisposizione della politica di manutenzione — Ispezioni periodiche . . . . .	118
4.15	Attività di manutenzione aggiuntive per i sottosistemi . . . . .	120
4.16	Esempio di sottosistema — motoriduttore . . . . .	120
4.17	Disponibilità di sistema — un componente; rateo di guasto costante ( $MTTF = 3000$ ); manutenzione correttiva ( $MTTR = 2450$ ); disponibilità asintotica= 0.55 . . . . .	121
4.18	Costo di esercizio — un componente; <i>Weibull</i> p.d.f. ( $X_0 = 1000$ $\beta = 5$ $\vartheta = 2000$ ); manutenzione correttiva con rinnovo al 30% e sostituzione al terzo intervento . . . . .	123
4.19	Rischio di esercizio — un componente; <i>Weibull</i> p.d.f. ( $X_0 = 500$ $\beta = 5$ $\vartheta = 2000$ ); manutenzione correttiva con rinnovo al 20%; sostituzione al terzo intervento; indice di danno <i>continuativo</i> =5 . . . . .	124
4.20	Rischio di esercizio — un componente; <i>Weibull</i> p.d.f. ( $X_0 = 500$ $\beta = 5$ $\vartheta = 2000$ ); manutenzione correttiva con rinnovo al 20%; sostituzione al terzo intervento; indice di danno <i>istantaneo</i> =100 . . . . .	124
4.21	Livello di magazzino — sistema isolato . . . . .	125
4.22	Livello di magazzino — soglia minima di riordino pari a 20 unità . . . . .	126
4.23	Disponibilità di manodopera . . . . .	127
4.24	Diagramma a blocchi di affidabilità . . . . .	132
4.25	Ridondanze passive — stand by master-slave e stand by simmetrico . . . . .	133
4.26	Condizioni di carico e cicli di carico con relativi profili di rischio	136
4.27	Rateo di guasto e probabilità di guasto di un singolo periodo	137
4.28	Estrazione del tempo al guasto — funzione hazard suddivisa in più periodi . . . . .	138
4.29	Interventi di manutenzione per diversi andamenti del rateo di guasto nel tempo . . . . .	142
5.1	Impianto oleodinamico . . . . .	146
5.2	Diagramma a blocchi di affidabilità dell'impianto . . . . .	149
5.3	Profilo di affidabilità del sistema . . . . .	152
5.4	Pareto delle affidabilità dei componenti . . . . .	153

5.5	Disponibilità limite teorica con manutenzine sul fluido vs altri componenti . . . . .	154
5.6	Disponibilità pratica con ispezioni e sostituzioni sul fluido . .	155
5.7	Disponibilità del sistema semi isolato . . . . .	155
5.8	Valutazione comparativa della convenienza economica . . . .	157
5.9	Diagramma Bi-Weibull di probabilità di guasto del motore .	161
5.10	Disponibilità del motore con politica di manutenzione del costruttore . . . . .	161
5.11	Disponibilità del motore con politica di manutenzione ottimizzata . . . . .	162
6.1	Superficie di massima verosimiglianza . . . . .	167
6.2	Superficie di massima verosimiglianza logaritmica . . . . .	171
6.3	Diagramma a blocchi di affidabilità di un componente con due modi di guasto . . . . .	172
6.4	Probabilità di guasto in funzione dei km percorsi e percentuale di componenti difettosi superstiti . . . . .	176
B.1	Generazione di variabili aleatorie mediante inversione della cumulata . . . . .	194

# Elenco delle tabelle

1.1	Applicazioni tipiche dei processi stocastici e grado di difficoltà	16
2.1	Conseguenze dei guasti funzionali e interventi manutentivi proposti	34
4.1	Specifica del codice RAMSES	93
4.2	Specifica del codice RAMSES — segue	94
4.3	Specifica del codice RAMSES — segue	95
4.4	Specifica del codice RAMSES — segue	96
5.1	Parametri di guasto per la simulazione del sistema	151
5.2	Scheda di manutenzione programmata dell'autovettura	158
5.3	Sensibilità degli esperti al guasto motore	159
5.4	Parametri delle Bi-Weibull per la simulazione	160
6.1	Dati di guasto censurati per intervalli: eventi di guasto raccolti per classi di percorrenza chilometrica	169
6.2	Dati di guasto censurati per intervalli: vetture superstiti per classi di percorrenza chilometrica	170
6.3	Andamento dei componenti difettosi superstiti nel parco di vetture circolanti	175



# Prefazione

Lo scopo di questa tesi di dottorato di ricerca, consiste nel fornire la giusta collocazione della manutenzione fra le discipline dell'ingegneria, raccogliendo e formalizzando le metodologie di analisi di affidabilità e di pianificazione degli interventi all'interno di un unico processo di progettazione e di controllo. In linea di principio, un processo di analisi dei guasti e di programmazione della manutenzione deve essere in grado di fornire chiare e sicure risposte ai seguenti interrogativi:

- Quali sono le funzioni richieste e con quali criteri di prestazioni il sistema è chiamato ad assolverle?
- Qual'è l'andamento della disponibilità del sistema in funzione del tempo?
- Quanti guasti e di quale tipo si possono verificare durante la vita del sistema?
- Quali possono essere le conseguenze che ledono la sicurezza e la protezione ambientale?
- Quanti pezzi di ricambio sono necessari?
- Che tipo di interventi di manutenzione preventiva risultano tecnicamente fattibili? A quali scadenze devono essere programmati?
- A quanto ammonta la previsione del costo di esercizio del sistema?
- Quante squadre di manutenzione devono essere assegnate al sistema?
- Come deve essere organizzata la logistica di manutenzione?
- Con quali tecniche si prevede di riconoscere i guasti e quali procedure devono essere attivate per farvi fronte?
- È possibile implementare tecniche di 'condition monitoring' delle macchine? Su quali tempi di preavviso sui guasti si può contare?

In tal senso, la manutenzione necessita delle tecniche e degli opportuni strumenti che siano in grado di misurarne l'efficacia e l'efficienza. L'efficacia in primo luogo, in quanto l'obiettivo principe consiste nel garantire che il sistema oggetto di studio continui a svolgere le proprie funzioni nei limiti di prestazioni accettabili, secondo le specifiche richieste degli utilizzatori. L'efficienza in secondo luogo, ma non per questo di minore importanza, in quanto perseguendo l'obiettivo di cui sopra, occorre impegnare il minimo di risorse possibili, organizzando con razionalità il supporto logistico del sistema al fine di raggiungere i massimi livelli di rendimento di gestione.

La migliore strategia di manutenzione può essere pianificata, a priori, solo se si è in grado di prevedere con la necessaria precisione l'evoluzione del sistema nel suo contesto operativo futuro. È allora possibile formulare un modello matematico del sistema, studiarne la dinamica ed osservare le reazioni alla simulazione di eventuali stimoli esterni. I metodi ed i modelli noti dell'ingegneria dei sistemi possono essere molto utili per la risoluzione di casi semplici, ma sovente richiedono la formulazione di ipotesi troppo restrittive che aumentano in modo inaccettabile la distanza del modello dalla realtà.

Una strada alternativa ed affascinante, che ho percorso con entusiasmo durante questi tre anni di studi e ricerca, consiste nella simulazione numerica della vita del sistema, utilizzando il metodo Monte Carlo per la gestione dei processi stocastici di guasto e per l'esecuzione degli interventi di manutenzione. Ho quindi messo a punto il codice di simulazione RAMSES, perseguendo l'idea di costruire uno strumento di misura dell'efficacia e dell'efficienza di una politica di manutenzione simulata al calcolatore.

Nei capitoli che seguono si presentano i concetti di base dell'ingegneria dei sistemi applicata al caso della manutenzione e si introduce il formalismo della *Reliability Centred Maintenance* come miglior guida nella pianificazione delle schede di manutenzione. Nel seguito si introducono le nozioni di base per fornire una struttura solida e corretta alla simulazione numerica dei sistemi riparabili e si presenta il codice RAMSES corredando le informazioni tecniche con i dovuti esempi ed applicazioni pratiche. Si conclude il lavoro, infine, con la presentazione di un modello di massima verosimiglianza particolarmente utile per le analisi dei dati sperimentali di guasto dei componenti.



# Capitolo 1

## Ingegneria dei sistemi applicata alla manutenzione

Introduciamo in questo capitolo, privilegiando la sintesi espositiva e la rapidità di lettura, le basi di ingegneria dei sistemi. Ci soffermeremo con una maggiore dovizia di particolari, sugli aspetti utili ad una più chiara comprensione degli argomenti esposti nei capitoli successivi, che presentano i modelli di affidabilità e le metodologie di simulazione numerica applicati al caso della manutenzione.

### 1.1 Definizione di componente

Si definisce componente un'entità caratterizzata da:

1. un numero finito di stati discreti
2. un insieme di funzioni o regole di trasferimento fra gli stati

La definizione degli stati è un processo arbitrario, che dipende dal livello di dettaglio al quale ci si vuole spingere nella formulazione del modello di un sistema. Gli stati permettono di identificare univocamente le caratteristiche di funzionamento del componente durante la sua evoluzione nel tempo.

Per comodità si utilizzi la variabile intera e discreta  $S$  per identificare i singoli stati. Per esempio, forniamo una descrizione dei possibili stati di un componente 'motore':

$S = 1$  stato passivo, cioè il motore non è guasto, ma al momento non viene utilizzato.

$S = 2$  stato operativo, o stato attivo di normale funzionamento.

$S = 0$  motore guasto.

Questi tre stati sono generalmente presenti nella definizione della maggioranza dei componenti, e possono essere sufficienti per formulare un buon modello di simulazione; nei casi specifici, tuttavia, la definizione degli stati può spingersi più nel dettaglio, per esempio ridefinendo lo stato di rottura  $S = 0$  ed aggiungendo altri stati come segue:

$S = 0$  il motore è rotto, il guasto è stato rilevato, le risorse di manutenzione sono disponibili, la riparazione è in progresso.

$S = -1$  il motore è rotto, ma il guasto non è stato ancora rilevato, pertanto nessun intervento manutentivo è in programma.<sup>1</sup>

$S = -2$  il motore è guasto, il problema è stato rilevato ma non può essere risolto causa la mancanza di una necessaria risorsa manutentiva.<sup>2</sup>

$S = -3$  il motore è malfunzionante, il guasto è stato rilevato, ma risulta temporaneamente non riparabile a causa di vincoli legati al contesto operativo del componente.<sup>3</sup>

$S = -4$  il motore non è guasto, ma è passivo a causa di lavori di manutenzione preventiva, atti a ridurre la probabilità che si guasti nel futuro.

$S = 3$  il componente viene utilizzato al massimo fattore di carico ammissibile, accelerando eventuali fenomeni di usura e di fatica.

Come si nota, la definizione degli stati deve essere univoca, nel senso che una stessa condizione di funzionamento, o di guasto, non può essere descritta con le stesse sfumature da due stati diversi. Al proposito si noti che gli stati descritti sopra, da  $S_{-4}$  a  $S_1$  sono tutti stati passivi, ed indicano pertanto la stessa condizione di funzionamento al tempo presente, ma specificano una diversa evoluzione del componente nel futuro.

Le funzioni di trasferimento fra gli stati sono tipicamente legate alla natura del componente ed alle interazioni del componente con il resto del sistema e con l'ambiente. In particolare possiamo suddividerle in due categorie:

---

<sup>1</sup>Questo tipo di stato è frequente quando i componenti non funzionano in continuo.

<sup>2</sup>Classicamente i pezzi di ricambio o la manodopera specializzata. Si noti che il problema dell'ottimizzazione delle risorse è di importanza fondamentale nell'ingegneria della manutenzione.

<sup>3</sup>Per esempio un motore aeronautico che si guasta in volo.

**processi stocastici intrinseci** sono processi aleatori che descrivono le proprietà intrinseche del componente. Il guasto improvviso di una lampadina ne è un tipico esempio.

**interazioni** sono processi che inducono il trasferimento fra stati a seguito di eventi esterni al componente. L'esempio classico è il caso della manutenzione, che controlla dall'esterno del componente le funzioni di trasferimento fra gli stati di rottura.

Si osservi che le funzioni di trasferimento possono descrivere sia processi stocastici che processi deterministici. In entrambi i casi possono essere trattate nell'ambito della teoria dei processi stocastici.<sup>4</sup>

Consideriamo, quindi, per il caso generale delle funzioni di trasferimento per processi stocastici, la funzione densità di probabilità di uscita dai singoli stati nella forma:

$$f(\mathcal{S}, t) \quad (1.1)$$

o in modo più compatto,  $f_i(t)$ . In particolare,  $f_i(t)dt$  esprime la probabilità che il componente, entrato nello stato  $\mathcal{S}$  al tempo  $t = 0$ , ne esca esattamente al tempo  $t$ .<sup>5</sup> Tale definizione contiene in sé tutte le informazioni necessarie per la simulazione della dinamica del sistema se e solo se il trasferimento da ogni singolo stato è univocamente diretto verso un solo stato di arrivo.<sup>6</sup>

Nei casi in cui il trasferimento di stato non sia univoco, occorre definire una funzione di trasferimento parziale, o funzione di *hazard* parziale, come  $z_{ij}(t - t_i)$ , che esprime la densità di probabilità che il componente, entrato nello stato  $i$  al tempo  $t_i$ , si trasferisca allo stato  $j$  al tempo  $t$ , condizionata al fatto che durante l'intervallo di tempo  $[t, t_i[$  il componente si mantenga nello stato  $i$ .

Nell'ipotesi di indipendenza statistica fra le funzioni di trasferimento parziali, l'espressione della funzione di trasferimento totale, anche nota come rateo totale di trasferimento, o funzione *hazard*, è la seguente:

$$z_i(t - t_i) = \sum_{j=1}^n z_{ij}(t - t_i) \quad (1.2)$$

cioè il rateo totale di trasferimento da uno stato  $i$  è la somma di tutti i ratei di trasferimento parziali in uscita da  $i$ . La dimostrazione è immediata. Osserviamo, ora, che data la probabilità di transizione dallo stato  $i$  allo stato  $j$  nella forma

$$F_{ij}(t) = 1 - e^{-\int_0^t z_{ij}(x) dx}$$

---

<sup>4</sup>Per i processi deterministici useremo funzioni densità di probabilità  $\delta$  di Dirac.

<sup>5</sup>Vedremo nella sez. 4.7.4 una metodologia per considerare delle funzioni di trasferimento definite a tratti con p.d.f. diverse.

<sup>6</sup>Per esempio il caso dei componenti non riparabili.

per la 1.2 possiamo scrivere la probabilità di uscita dallo stato  $i$  come:

$$F_i(t) = 1 - e^{-\int_0^t z_i(x) dx} \quad (1.3)$$

Derivando la 1.3 si ottiene la densità di probabilità di transizione in uscita da  $i$ :

$$f_i(t) = \frac{dF_i(t)}{dt} = z_i(t)e^{-\int_0^t z_i(x) dx} = \left( \sum_{j=1}^n z_{ij}(t) \right) e^{-\int_0^t z_i(x) dx}$$

che si può anche scrivere come:

$$f_i(t) = \left( \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}(t) \right) z_i(t) e^{-\int_0^t z_i(x) dx}$$

dove

$$\gamma_{ij} = \frac{z_{ij}(t)}{z_i(t)}$$

rappresenta la probabilità che il componente, in uscita al tempo  $t$  dallo stato  $i$  si trasferisca allo stato  $j$ .<sup>7</sup>

## 1.2 Sistema e funzione di sistema

Si definisce sistema un insieme di  $m$  componenti, con  $m \geq 1$ . Il vettore  $\vec{S} = (S_1, S_2, \dots, S_m)$ , i cui elementi rappresentano gli indicatori di stato dei singoli componenti, si chiama vettore di stato del sistema. Il dominio di esistenza del vettore si chiama spazio delle fasi del sistema.

In sè, la definizione di sistema non aggiungerebbe informazioni al concetto di componente, se non fosse che al sistema possono essere associate delle misure  $\mathcal{R}$  di prestazioni, definite come funzioni di sistema<sup>8</sup> nella generica forma

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}(\vec{S})$$

---

<sup>7</sup>Naturalmente

$$\sum_{j=1}^n \gamma_{ij}(t) = 1$$

essendo certo che il componente uscito dallo stato  $i$  raggiunga un qualsiasi stato  $j$  (principio di conservazione dei componenti!).

<sup>8</sup>Esempi tipici sono l'affidabilità, la disponibilità, la manutenibilità ...

## 1.3 Funzione di sistema: Affidabilità

Possiamo dare la seguente importante definizione della funzione di sistema affidabilità:

L'affidabilità è la misura della probabilità di successo di una missione.

dove per missione si intende lo svolgimento della funzione richiesta, per un ben determinato periodo di tempo, in condizioni di funzionamento nominali e sotto condizioni ambientali prefissate.

Il calcolo dell'affidabilità  $\mathcal{R}(t)$  dipende quindi dal tipo di missione (la funzione che gli utilizzatori richiedono al sistema), dalla durata della missione (per quanto tempo il sistema deve continuare ad assolvere alla funzione richiesta) e dal profilo di missione (le prestazioni richieste, che incidono sull'intensità delle sollecitazioni e le condizioni ambientali,<sup>9</sup> più o meno favorevoli al sistema).

### 1.3.1 Affidabilità di un sistema monocomponente

Consideriamo un sistema costituito da un solo componente e ricaviamo l'espressione della funzione di sistema affidabilità. Per cominciare, definiamo gli stati del componente, e precisamente:

$\mathcal{S}_1$  componente funzionante

$\mathcal{S}_0$  componente guasto

In questo caso le funzioni di trasferimento sono 2 e sono univocamente definite dalla densità di probabilità  $f(t)$  di uscire dallo stato  $\mathcal{S}_1$  (l'unica soluzione di trasferimento possibile è verso lo stato  $\mathcal{S}_0$ ) e dalla densità di probabilità di uscire dallo stato  $\mathcal{S}_0$ <sup>10</sup> (tornando, secondo l'unica soluzione possibile, allo stato  $\mathcal{S}_1$ ).

Osserviamo che le condizioni di funzionamento nominali del componente, ed i vincoli legati al contesto ambientale, sono le informazioni necessarie e sufficienti per la definizione delle funzioni di trasferimento. Consideriamo quindi nota la  $f(t)$ .

---

<sup>9</sup>Le condizioni ambientali definiscono dal punto di vista tecnico il contesto operativo del sistema. Per esempio, temperatura di esercizio  $+40^\circ\text{C}$ , temperature di stoccaggio da  $-20^\circ\text{C}$  a  $+50^\circ\text{C}$ , umidità dal 40 al 60%, presenza di polveri o agenti corrosivi, accelerazioni massime di  $0.5g$  a frequenze da 10 a 30Hz e così via.

<sup>10</sup>Nel calcolo dell'affidabilità possiamo trascurare questa seconda funzione di trasferimento, limitandoci a considerare il sistema come non riparabile.

Definiamo, poi, la funzione richiesta dagli utilizzatori come ‘il normale funzionamento del sistema per una durata pari a  $T$ ’.

A questo punto la missione è definita nei minimi dettagli, per cui si vede che la funzione di sistema affidabilità può essere espressa come la probabilità che il sistema si mantenga nello stato  $\vec{\mathcal{S}} = (\mathcal{S}_1)$ , per tutta la durata di missione  $T$ :

$$\mathcal{R}(T) = 1 - \int_0^T f(x) dx = 1 - F(T)$$

dove la  $F(t)$  rappresenta la cumulata della funzione di trasferimento  $f(t)$ . Ricordando l’equazione 1.3 si può anche scrivere:

$$\mathcal{R}(T) = e^{-\int_0^T \lambda(x) dx}$$

introducendo il rateo di trasferimento  $\lambda(t)$ , noto in letteratura come rateo di guasto.<sup>11</sup>

### 1.3.2 Rateo di guasto del componente

Nella sezione 1.3.1 abbiamo visto che il calcolo dell’affidabilità di un sistema costituito da un singolo componente è riconducibile al problema di stimare l’espressione della distribuzione di probabilità di guasto  $f(t)$ , o in alternativa l’andamento del rateo di guasto  $\lambda(t)$ .

Dal punto di vista pratico, risulta più conveniente percorrere la seconda strada proposta, concettualmente più vicina alle osservazioni sperimentali delle frequenze di guasto dei sistemi.

In figura 1.1 si mostra disegnato in linea continua, un esempio dell’andamento del rateo di guasto in funzione del tempo, secondo il classico profilo a ‘vasca da bagno’.<sup>12</sup> Le crocette appuntate all’asse dei tempi rappresentano una plausibile evidenza sperimentale dei malfunzionamenti di esercizio per un sistema realmente caratterizzato da un comportamento al guasto siffatto. Si noti, al proposito, che un addensamento delle crocette sull’asse dei tempi implica necessariamente un aumento del rateo di guasto, e viceversa, la dispersione delle osservazioni sperimentali di guasto ne giustificano la riduzione.

Dal punto di vista matematico, è possibile formulare un modello a vasca da bagno sommando il contributo di tre distinte funzioni densità di probabilità di guasto. Per esempio, utilizzando la distribuzione di Weibull,

<sup>11</sup>In effetti  $\lambda(t)$  rappresenta dal punto di vista fisico il rateo di trasferimento del componente verso lo stato di guasto  $\mathcal{S}_{fault}$ .

<sup>12</sup>Generalmente utilizzato per descrivere tre fasi della vita di un componente, nell’ordine la mortalità infantile, la vita utile, e l’ultima fase di invecchiamento ed usura.

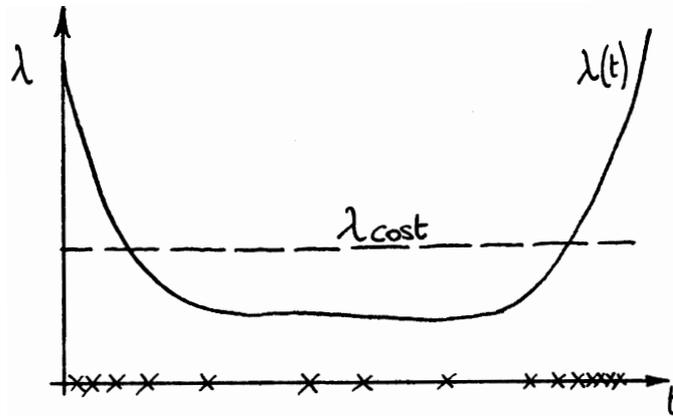


Figura 1.1: Rateo di guasto in funzione del tempo

impostando opportunamente i parametri per ottenere tre ratei di guasto polinomiali con andamenti decrescente ( $\beta < 1$ ), costante ( $\beta = 1$ ) e crescente ( $\beta > 1$ ). Per ulteriori dettagli si faccia riferimento all'appendice A.3.2 e alla sezione 4.7.4.

Nella maggioranza dei casi pratici, tuttavia, i dati di guasto disponibili sono pochi<sup>13</sup> e non permettono una distinzione chiara e netta delle tre zone della curva a vasca da bagno. Di più non tutti i componenti meccanici presentano un tale comportamento al guasto. È tipica per le applicazioni aeronautiche, infatti, una elevata incidenza di fenomeni di guasto caratterizzati dai soli guasti infantili e dai guasti casuali del periodo di vita utile.

L'approssimazione dei dati secondo una curva di rateo di guasto costante nel tempo, come si indica in tratteggio in figura 1.1, non solo può essere l'unica soluzione proponibile, ma spesso coincide anche con la realtà dei fatti, come avviene per il caso dei componenti elettronici.

Secondo tale importante approssimazione, pur con tutti i limiti del caso,<sup>14</sup> l'affidabilità di un sistema per una missione di durata  $\Delta T$  diventa:

$$\mathcal{R}(\Delta T) = e^{-\lambda \Delta T}$$

Osserviamo, per concludere, che esistono archivi di dati che contengono i valori numerici del rateo di guasto costante nel tempo, per componenti

<sup>13</sup>Le analisi dei dati sperimentali vengono generalmente promosse a seguito di un'elevata criticità dei guasti. È ragionevole ritenere, quindi, che si faccia il possibile per ridurre al massimo l'occorrenza.

<sup>14</sup>In particolare si perde la memoria del passato e non risulta possibile descrivere fenomeni di usura o di mortalità infantile. L'affidabilità è uguale per tempi di missione uguali.

elettronici ed elettromeccanici, riferiti alle condizioni standard di funzionamento.<sup>15</sup> È possibile stimare il valore più opportuno da inserire nei calcoli con la formula seguente, di validità generale:

$$\lambda = \lambda_0 \pi_U \pi_E \pi_Q$$

dove il valore  $\lambda_0$  letto dal manuale viene corretto con un fattore di utilizzo  $\pi_U \in [0, 1]$ , un fattore  $\pi_E > 0$  legato alle condizioni ambientali e all'intensità dei carichi ed un fattore  $\pi_Q > 0$  legato alla qualità di produzione.

### 1.3.3 Affidabilità di un sistema con più componenti

A livello di sistemi costituiti da  $m > 1$  componenti, la funzione di sistema affidabilità  $\mathcal{R} = \mathcal{R}(\vec{S}, \mathcal{L})$  dipende ancora dallo stato del sistema, e quindi dall'affidabilità dei singoli componenti, e in più dal modo in cui tali componenti interagiscono per assolvere alla funzione richiesta.

La logica  $\mathcal{L}$  di funzionamento del sistema dipende in modo pesante dai requisiti della missione. Viene generalmente codificata in appositi diagrammi a blocchi di affidabilità, previa l'esecuzione di un'analisi funzionale.

### 1.3.4 Diagramma a blocchi di affidabilità — RBD

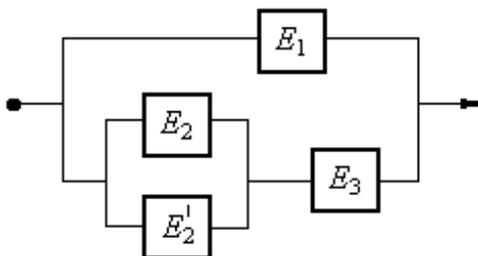


Figura 1.2: Esempio di diagramma a blocchi di affidabilità

Il diagramma a blocchi di affidabilità, di cui si mostra un esempio in figura 1.2, fornisce una rappresentazione grafica della struttura logica  $\mathcal{L}$  che il sistema utilizza nell'affrontare la missione.<sup>16</sup>

<sup>15</sup>Citiamo, fra i tanti, il *RAC NEPRD*, il *Bellcore TR-332*, il *MIL-HDBK-217*, l'*IEC 61709* ...

<sup>16</sup>Il sistema sfrutta sempre al meglio le proprie risorse per portare a termine con successo la missione, così come un plotone di soldati si schiera nel modo più opportuno per acquisire il massimo vantaggio in battaglia.

È chiaro, che per dato sistema fisico, la struttura del RBD<sup>17</sup> dipende dal tipo di missione da compiere. Per fare un esempio, consideriamo il caso pratico del sistema di pompaggio di un circuito primario in un reattore PWR, tipicamente realizzato con gruppi di quattro o più pompe idrauliche fisicamente disposte in parallelo. Consideriamo i due seguenti profili di missione:

1. barre completamente inserite, con portata di fluido refrigerante al minimo per garantire l'asportazione del solo calore dovuto al decadimento dei prodotti di fissione.
2. reattore funzionante alla massima potenza di targa, con la portata di fluido refrigerante massima di esercizio.

Supponiamo, inoltre, che dai risultati dell'analisi funzionale condotta su tale gruppo di pompaggio, risulti che una singola pompa sia perfettamente in grado di fare fronte alla portata minima richiesta, mentre che per garantire la portata massima di esercizio siano necessarie almeno 3 pompe funzionanti sulle 4 complessivamente disponibili.

Nel primo caso di missione segue che il RBD del sistema di pompaggio presenta quattro componenti funzionali di tipo pompa disposti in parallelo, usufruendo, quindi, del massimo margine di affidabilità. Nel secondo caso, invece, il RBD contiene un macro gruppo funzionale di componenti pompa disposti in logica ridondante, con ridondanza attiva *3 su 4* ed un margine di affidabilità decisamente più ridotto.

Fatta questa doverosa premessa, osserviamo che la composizione del diagramma risulta più semplice se si è in grado di rispondere con sicurezza alla seguente domanda:

Quali elementi del sistema sono indispensabili per soddisfare la funzione richiesta durante la missione? Quali, al contrario, possono guastarsi senza che la funzione risultante del sistema ne resti compromessa?

I componenti indispensabili per lo svolgimento del compito saranno posti in serie nel diagramma, mentre i componenti ridondanti (e cioè quelli che possono guastarsi senza alterare la capacità di risposta del sistema) verranno opportunamente disposti in parallelo. Secondo questa logica gli elementi funzionano come interruttori elettrici. Un elemento guasto implica un interruttore aperto, mentre un elemento correttamente funzionante è equivalente al circuito chiuso.

---

<sup>17</sup> *Reliability Block Diagram.*

Durante la vita del sistema, questi interruttori virtuali si aprono e si chiudono a seconda che i relativi componenti si siano guastati, oppure che siano stati riparati. Per verificare se il sistema è funzionante, proseguendo nell'analogia elettrica, è sufficiente applicare una tensione ai capi del circuito ed osservare se passa corrente.

Concludiamo ribadendo che le informazioni contenute nel diagramma a blocchi di affidabilità concorrono unicamente a definire la logica di funzionamento  $\mathcal{L}$  nel rispetto dei requisiti della missione. Pertanto, ad ogni singolo blocco logico del diagramma competono due e soltanto due stati di funzionamento del componente interessato, lo stato funzionante e lo stato di guasto.<sup>18</sup> Di più, ad ogni singolo blocco viene associato un unico modo di guasto del componente.<sup>19</sup>

## 1.4 Metodi di calcolo affidabilistico dei sistemi

Presentiamo in questa sezione i metodi più diffusi per comporre la funzione di stato affidabilità.

### 1.4.1 Strutture in serie

In questo caso il sistema sarà funzionante se lo sono contemporaneamente tutti gli elementi della catena. Nell'ipotesi in cui i modi di guasto dei componenti siano statisticamente indipendenti, per il teorema della moltiplicazione delle probabilità (cfr. appendice A.2.2), risulta evidente che l'affidabilità del sistema è la produttoria delle affidabilità dei singoli componenti:

$$\mathcal{R}(t) = \prod_{i=1}^n \mathcal{R}_i(t)$$

Nel caso di ratei di guasto  $\lambda_i$  costanti nel tempo si ottiene:

$$\mathcal{R}(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}$$

### 1.4.2 Strutture in parallelo

In questo caso, reciprocamente alla sezione precedente, il sistema sarà guasto<sup>20</sup> se lo sono contemporaneamente tutti i componenti del parallelo. Sem-

<sup>18</sup>Gli stati di funzionamento degradato non vengono presi in considerazione.

<sup>19</sup>Componenti caratterizzati da più modi di guasto vengono strutturati considerando un collegamento in serie fra tanti blocchetti logici, uno per ogni modo di guasto.

<sup>20</sup>Per stato di guasto del sistema non si intende la rottura fisica di tutti i componenti, bensì l'impossibilità di fare fronte alla funzione richiesta. In tal senso conviene parlare di guasto funzionale del sistema.

pre nell'ipotesi di indipendenza statistica fra i componenti, il calcolo della produttoria vale per la probabilità di guasto  $F(t)$ :

$$F(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t)$$

da cui segue che

$$\mathcal{R}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - \mathcal{R}_i(t)]$$

Nel caso più semplice del parallelo fra due componenti si ottiene:

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 - \mathcal{R}_1 \mathcal{R}_2$$

### 1.4.3 Conteggio delle parti

Questo metodo, di rapidissima applicazione, sfrutta l'ipotesi estremamente conservativa, secondo la quale tutti i componenti del sistema sono considerati egualmente indispensabili per lo svolgimento della missione, e tutti i rispettivi modi di guasto sono fra loro statisticamente indipendenti. Sotto tale ipotesi l'affidabilità si calcola come il prodotto delle affidabilità dei singoli componenti:

$$\mathcal{R}(t) = \prod_{i=1}^n \mathcal{R}_i(t)$$

Questo metodo è utile durante le primissime fasi della progettazione, per stimare l'andamento minimo teorico dell'affidabilità nel tempo.

### 1.4.4 Metodo dell'elemento chiave

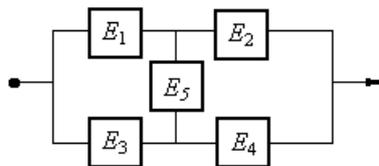


Figura 1.3: Esempio di un diagramma a blocchi di affidabilità a ponte

Può capitare, nella pratica, di dover calcolare la funzione di affidabilità di un diagramma a ponte, del tipo rappresentato in figura 1.3, oppure di dovere considerare casi in cui gli elementi non sono fra loro statisticamente indipendenti.<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup>Un tipico esempio è la ricorrenza dello stesso componente fisico in più posizioni logiche all'interno del diagramma.

In questo caso le regole di composizione della  $\mathcal{R}(t)$  per la serie ed il parallelo non sono sufficienti. Bisogna quindi semplificare il diagramma scegliendo un elemento chiave e scindendo il problema nei seguenti due casi mutuamente escludentisi:

**elemento chiave funzionante** la probabilità di questo evento è  $\mathcal{R}_{chiave}(t)$ . Il diagramma si semplifica sostituendo al simbolo dell'elemento chiave un 'corto circuito'<sup>22</sup>

**elemento chiave guasto** la probabilità di questo evento è complementare alla precedente, e precisamente  $1 - \mathcal{R}_{chiave}(t)$ . In questo caso l'elemento viene sostituito nel diagramma da un circuito aperto.

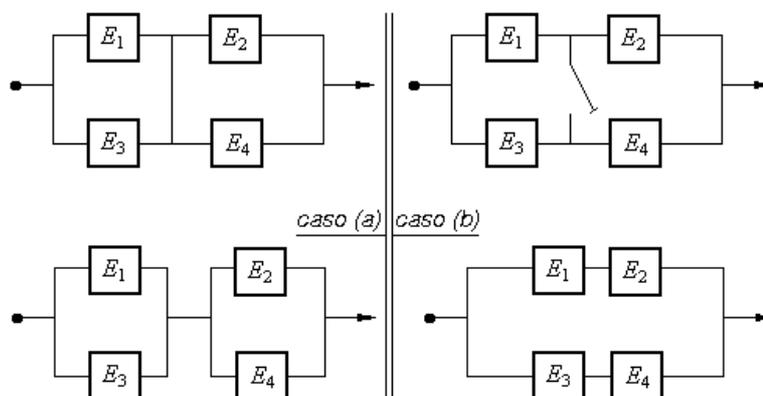


Figura 1.4: Diagramma a ponte semplificato nel caso (a) con  $E_5$  funzionante e nel caso (b) con  $E_5$  guasto

Per l'esempio di figura, scegliamo come elemento chiave l'elemento  $E_5$ . Il RBD si semplifica nei due sottocasi schematizzati in figura 1.4, da cui si può calcolare l'affidabilità del sistema con il teorema dell'addizione per eventi mutuamente escludentisi (cfr. appendice A.2.1) come segue:

Caso (a),  $\mathcal{P}(a) = \mathcal{R}(E_5)$

$$\mathcal{R}_a = \left[ \mathcal{R}(E_1) + \mathcal{R}(E_3) - \mathcal{R}(E_1)\mathcal{R}(E_3) \right] \left[ \mathcal{R}(E_2) + \mathcal{R}(E_4) - \mathcal{R}(E_2)\mathcal{R}(E_4) \right]$$

Caso (b),  $\mathcal{P}(b) = 1 - \mathcal{R}(E_5)$

$$\mathcal{R}_b = \mathcal{R}(E_1)\mathcal{R}(E_2) + \mathcal{R}(E_3)\mathcal{R}(E_4) - \mathcal{R}(E_1)\mathcal{R}(E_2)\mathcal{R}(E_3)\mathcal{R}(E_4)$$

<sup>22</sup>Dal punto di vista logico, in questo sottocaso si ha la certezza del funzionamento del componente (questa è l'ipotesi assunta!).

da cui, per il teorema dell'addizione, otteniamo l'affidabilità complessiva del sistema  $\mathcal{R}_{sys} = \mathcal{P}(a)\mathcal{R}_a + \mathcal{P}(b)\mathcal{R}_b$ :

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{sys} = & \mathcal{R}(E_5) \left[ \mathcal{R}(E_1) + \mathcal{R}(E_3) - \mathcal{R}(E_1)\mathcal{R}(E_3) \right] \left[ \mathcal{R}(E_2) + \mathcal{R}(E_4) - \mathcal{R}(E_2)\mathcal{R}(E_4) \right] + \\ & + \left[ 1 - \mathcal{R}(E_5) \right] \left[ \mathcal{R}(E_1)\mathcal{R}(E_2) + \mathcal{R}(E_3)\mathcal{R}(E_4) - \mathcal{R}(E_1)\mathcal{R}(E_2)\mathcal{R}(E_3)\mathcal{R}(E_4) \right] \end{aligned}$$

## 1.5 Disponibilità dei sistemi riparabili

Lo studio analitico dei sistemi riparabili, come si mostra schematicamente nella tabella 1.1, necessita delle applicazioni di una vasta classe di processi stocastici, a partire dai semplici Poisson, per passare ai Markov e semi Markov, fino anche a processi rigenerativi complessi. I processi non rigenerativi, invece, pur essendo i più interessanti per le forti implicazioni ai casi reali di manutenzione, si dimostrano troppo complessi per una soluzione analitica e restano quindi oggetto di studio per la simulazione numerica, che presentiamo nel capitolo 3.

Gli strumenti essenziali per gli studi della disponibilità dei sistemi, in parte già presentati, sono i diagrammi a blocchi di affidabilità, le distribuzioni di probabilità che descrivono le funzioni di transizione di stato dei componenti, le informazioni inerenti la strategia di manutenzione, il supporto logistico, le ridondanze ed in generale le dipendenze fra gli elementi.

Le espressioni della disponibilità istantanea, asintotica e dell'affidabilità in intervalli di missione possono essere ricavate analiticamente solo nei casi dei processi stocastici più semplici e sotto ipotesi strettamente semplificative della struttura del sistema, della fisica del guasto dei componenti e delle distribuzioni di probabilità dei tempi di riparazione. In particolare si avanzano delle ipotesi di carattere generale, che trovano una sintetica descrizione qui di seguito:

**Operazione in continuo** per tutti i componenti del sistema che non sono guasti o soggetti alle riparazioni.

**Assenza di guasti passivi** indotti, cioè da periodi di forzata inattività del sistema.

**Una singola squadra di manutenzione** che agisce a livello di sistema, scendendo verso i componenti secondo strategie opportune, del tipo a coda FIFO<sup>23</sup> o per priorità di intervento.

**Ridondanze** per i componenti ridondanti guasti si assume che la riparazione venga effettuata senza disattivare il sistema

---

<sup>23</sup> *First In First Out.*

<b>Processi stocastici</b>	<b>Applicazioni tipiche</b>	<b>Basi</b>	<b>Difficoltà</b>
Processi di rinnovo	Riserva dei pezzi di ricambio, ratei di guasto arbitrari, tempi di riparazione trascurabili	Teoria del rinnovo	Media
Processi di rinnovo alternato	Un componente riparabile, ratei di guasto e tempi di riparazione arbitrari	Teoria del rinnovo	Media
Processi di Markov omogenei	Sistemi con struttura arbitraria, i cui elementi hanno ratei di guasto e di riparazione costanti	Equazioni differenziali	Bassa
Processi semi Markov	Sistemi i cui elementi presentano ratei di guasto costanti o con distribuzione di Erlang e tempi di riparazione arbitrari	Equazioni integrali	Media
Processi semi rigenerativi	Sistemi con struttura arbitraria, i cui elementi hanno ratei di guasto costanti e ratei di riparazione arbitrari; alcune strutture ridondanti i cui elementi possono presentare anche ratei di guasto arbitrari	Equazioni integrali	Alta
Processi non rigenerativi	Sistemi reali, con ratei di guasto e di riparazione arbitrari, con fenomeni di propagazione dei guasti e logiche di dipendenza statistica fra gli eventi	Calcoli sofisticati; equazioni alle derivate parziali	Smodata

Tabella 1.1: Applicazioni tipiche dei processi stocastici e grado di difficoltà

**As good as new** ipotesi secondo la quale un intervento di manutenzione riporta lo stato del componente riparato agli stessi parametri di un componente nuovo.

**Indipendenza statistica** le variabili aleatorie dei tempi di funzionamento al guasto e dei tempi di riparazioni vengono considerate statisticamente indipendenti.

**Supporto logistico** si trascurano gli interventi di manutenzione preventiva; l'attivazione / disattivazione dei componenti in ridondanza è immediata; la disponibilità dei pezzi di ricambio è illimitata.

Osserviamo, in conclusione, che i modelli analitici lavorano bene, e sono di notevole aiuto, per i casi di strutture ragionevolmente semplici. Nella

pratica i problemi di calcolo della disponibilità dei sistemi possono essere efficacemente risolti con la simulazione numerica mediante il metodo Monte Carlo.

### 1.5.1 Disponibilità istantanea

Consideriamo il caso di un componente, con rateo di guasto  $\lambda$  e rateo di riparazione  $\mu$  costanti nel tempo. Si definisce disponibilità istantanea la funzione di sistema  $\mathcal{D}(t)$ , come la probabilità che il componente sia funzionante all'istante  $t$ , condizionata al fatto che per  $t = 0$  il componente fosse nuovo e funzionante. Ricaviamo l'espressione analitica, che si ottiene con una certa difficoltà anche per un caso cos'ì semplice.

Consideriamo, per cominciare, la definizione di  $\mathcal{D}(t|k)$ , probabilità che il componente sia funzionante all'istante  $t$ , posto che fosse nuovo e funzionante all'istante  $t = 0$  e posto che si siano verificati esattamente  $k$  guasti in  $]0, t[$ . Da questa premessa segue che:

$$\mathcal{D}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \mathcal{D}(t|k) \quad (1.4)$$

Per inciso, si noti anche che si può scrivere  $\mathcal{R}(t) = \mathcal{D}(t|0)$ , essendo  $\mathcal{D}(t|0)$  la probabilità che il componente sia funzionante all'istante  $t$ , posto che non si sia verificato alcun guasto in  $[0, t[$ . Vediamo ora la forma di  $\mathcal{D}(t|1)$ , che indica la probabilità di osservare esattamente un guasto ed una riparazione nell'intervallo  $[0, t[$ . Esistono chiaramente  $\infty^2$  'storie utili', o combinazioni di guasto e di successive riparazioni, che apportano il loro contributo personale al calcolo della  $\mathcal{D}(t|1)$ . Se indichiamo le due funzioni di transizione di stato del componente come  $f(t)$  e  $g(t)$ ,<sup>24</sup> possiamo supporre che durante l'evoluzione di una generica 'storia utile', il guasto avvenga all'istante di tempo  $t = t_1$ , con  $t_1 \in [0, t[$  e probabilità  $f(t_1)$ ; che la riparazione avvenga al tempo  $t = t_2$ , con  $t_2 \in [t_1, t[$  e probabilità  $g(t_2 - t_1)$ ; che il componente non si guasti più fino al tempo  $t$ , con probabilità  $1 - F(t - t_2)$ .

La generica 'storia utile' è quindi univocamente determinata dalla sequenza dei tre eventi elementari rappresentati schematicamente in figura 1.5:

- guasto in  $t_1$
- riparazione in  $t_2$
- sopravvivenza fino a  $t$

---

<sup>24</sup>Rispettivamente, la funzione densità di probabilità di guasto e la funzione densità di probabilità di riparazione. Ricordiamo anche, che in questo caso gli stati possibili del componente sono solamente due, e precisamente lo stato di funzionamento e lo stato di guasto.

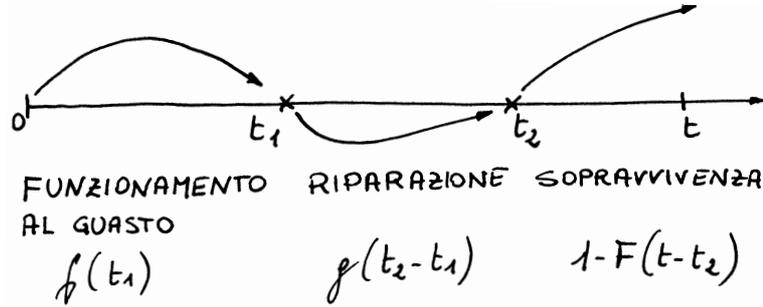


Figura 1.5: Sequenza di eventi possibili per la  $\mathcal{D}(t|1)$

che sono fra loro statisticamente indipendenti. Possiamo allora calcolare la probabilità che il componente evolva secondo la generica ‘storia utile’ come:

$$\mathcal{P}_{utile} = f(t_1) \times g(t_2 - t_1) \times [1 - F(t - t_2)]$$

Le singole ‘storie utili’ sono fra loro mutuamente escludentisi, per cui, per il teorema dell’addizione delle probabilità per eventi disgiunti, è possibile calcolare  $\mathcal{D}(t|1)$  come la somma della probabilità  $\mathcal{P}_{utile}$  estesa a tutte le possibili ‘storie utili’:

$$\mathcal{D}(t|1) = \int_0^t \int_{t_1}^t f(x)g(y-x)[1-F(t-y)] dy dx$$

Per estensione ricaviamo l’espressione di  $\mathcal{D}(t|k)$ :

$$\mathcal{D}(t|k) = \int_0^t \int_{t_1}^t \cdots \int_{t_{2k-1}}^t f(t_1)g(y-t_1) \cdots g(z-t_{2k-1}) [1-F(t-z)] dz \cdots dy dx$$

dove si hanno  $k$  guasti ai tempi  $t_1, t_3, \dots, t_{2k-1}$  e  $k$  riparazioni ai tempi  $t_2, t_4, \dots, t_{2k}$ .

Come suggerisce la figura 1.6, possiamo riscrivere la  $\mathcal{D}(t|k)$  in forma più compatta:

$$\mathcal{D}(t|k) = \int_0^t \psi_k(z) [1 - F(t - z)] dz \quad (1.5)$$

dove

$$\psi_k(z) = \int_{t_1}^t \cdots \int_{t_{2k-1}}^t f(t_1)g(y-t_1) \cdots g(z-t_{2k-1})$$

è la funzione densità di probabilità della variabile aleatoria  $z$ , ultimo istante di una sequenza alternata di  $k$  guasti e  $k$  riparazioni. Possiamo adesso sostituire la 1.5 nella 1.4, estraendo il termine  $\mathcal{R}(t) = \mathcal{D}(t|0)$  al di fuori della sommatoria:

$$\mathcal{D}(t) = e^{-\lambda t} + \int_0^t \left[ \sum_{k=1}^{\infty} \psi_k(z) \right] e^{-\lambda(t-z)} dz \quad (1.6)$$

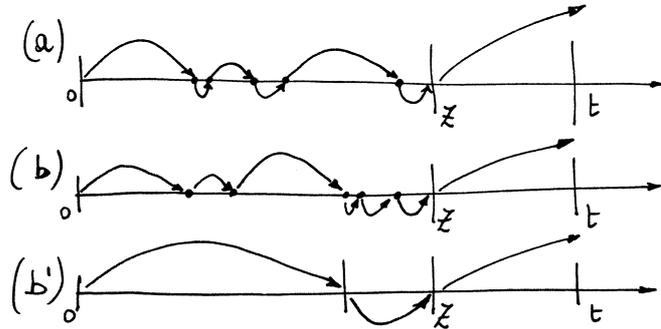


Figura 1.6: Equivalenza dei processi stocastici (a) e (b), per la variabile aleatoria  $z$

Si noti che l'integrale e la serie sono stati cambiati di posto, essendo entrambi operatori addittivi. Le espressioni di  $\mathcal{R}(t)$  ed  $F(t)$ , inoltre, vengono sostituite con le formule relative al caso di rateo di guasto costante  $\lambda$ .

Cerchiamo, adesso, una forma più conveniente per il termine  $\psi_k(z)$ . In particolare, osservando la figura 1.6, si nota che i processi stocastici (a) e (b) sono del tutto equivalenti dal punto di vista matematico.<sup>25</sup> In particolare, il processo stocastico (b) può essere interpretato secondo lo schema (b'), da cui si deduce che:

$$z = z_1 + z_2; \quad z_1 = \sum_{i=1}^k t_{gi}; \quad z_2 = \sum_{j=1}^k t_{rj}$$

La variabile aleatoria  $z$  è la somma delle variabili aleatorie  $z_1$  e  $z_2$ ; pertanto la funzione densità di probabilità  $\psi_k(z)$  può anche esprimersi come integrale di convoluzione delle funzioni densità di probabilità  $f_{z_1}^k(t)$  e  $f_{z_2}^k(t)$ . In formule:

$$\psi_k(z) = \int_0^z f_{z_1}^k(x) f_{z_2}^k(z-x) dx \quad (1.7)$$

o anche, che è del tutto equivalente:

$$\psi_k(z) = \int_0^z f_{z_1}^k(z-x) f_{z_2}^k(x) dx$$

Osserviamo, a questo punto, che la  $f_{z_1}^k(t)$  e la  $f_{z_2}^k(t)$  sono note, in quanto entrambe le variabili casuali  $z_1$  e  $z_2$  sono la somma, rispettivamente, di tempi al guasto e di tempi di riparazione distribuiti secondo le funzioni densità di probabilità esponenziale  $\lambda e^{-\lambda t}$  e  $\mu e^{-\mu t}$ . La p.d.f.<sup>26</sup> della somma di  $k$  variabili

<sup>25</sup>Non lo sono dal punto di vista fisico, essendo impossibile, nel nostro caso, che le funzioni di trasferimento non alterino lo stato del sistema.

<sup>26</sup>probability density function.

aleatorie statisticamente indipendenti e con distribuzione esponenziale è la distribuzione Gamma  $G_k(t)$ :

$$f_{z1}^k(t) = G_k(t) = \frac{\lambda(\lambda t)^{k-1} e^{-\lambda t}}{\Gamma(k)}$$

e analogamente per la  $f_{z2}^k(t)$ , sostituendo  $\mu$  a  $\lambda$

L'equazione 1.7 viene quindi riscritta nei termini della convoluzione delle due distribuzioni Gamma, relative ai tempi al guasto e ai tempi di riparazione, tenendo conto che, per valori interi di  $k$ ,  $\Gamma(k) = (k-1)!$ .

$$\psi_k(z) = \frac{\lambda^k \mu^k}{(k-1)!(k-1)!} \int_0^z x^{k-1} e^{-\lambda x} (z-x)^{k-1} e^{-\mu(z-x)} dx$$

Per la soluzione dell'integrale di convoluzione, che compare nell'espressione della  $\psi_k(z)$ , conviene passare alla trasformata di Laplace. Considerando che:

1. la trasformata di una convoluzione di funzioni  $\mathcal{L} \left[ \int_0^t f(x)g(t-x) dx \right]$  è il prodotto delle trasformate delle funzioni stesse  $\tilde{f}(s)\tilde{g}(s)$
2.  $\mathcal{L} [x^{k-1} e^{-\lambda x}] = \frac{(k-1)!}{(s+\lambda)^k}$

si ottiene, per la  $\tilde{\psi}_k(s)$ :

$$\tilde{\psi}_k(s) = \left( \frac{\lambda}{s+\lambda} \times \frac{\mu}{s+\mu} \right)$$

Osserviamo, ora, che la trasformata di Laplace, essendo un operatore integrale, ne mantiene anche la proprietà addittiva, per cui si può scrivere:

$$\mathcal{L} \left[ \sum_{k=1}^{\infty} \psi_k(z) \right] = \sum_{k=1}^{\infty} \left( \frac{\lambda}{s+\lambda} \times \frac{\mu}{s+\mu} \right)$$

Dalla convergenza della serie risulta:

$$\mathcal{L} \left[ \sum_{k=1}^{\infty} \psi_k(z) \right] = \frac{\lambda\mu}{s(s+\lambda+\mu)}$$

e antitrasformando si ottiene:

$$\sum_{k=1}^{\infty} \psi_k(z) = \frac{\lambda\mu(1 - e^{-(\lambda+\mu)z})}{\lambda + \mu}$$

Sostituendo questa espressione nella 1.6, la formula della disponibilità diventa:

$$\mathcal{D}(t) = e^{-\lambda t} + \int_0^t \frac{\lambda\mu(1 - e^{-(\lambda+\mu)z})}{\lambda + \mu} e^{-\lambda(t-z)} dz$$

da cui, risolvendo il semplice integrale, si ottiene la funzione di sistema di disponibilità per il caso di un componente singolo, con rateo di guasto costante  $\lambda$  e rateo di riparazione costante  $\mu$ :

$$\mathcal{D}(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (1.8)$$

### 1.5.2 Disponibilità asintotica

Si osservi che la forma dell'equazione 1.8 contiene un primo addendo costante, ed un secondo addendo che si estingue nel tempo. È allora possibile ricavare il valore asintotico della disponibilità nella forma:

$$\mathcal{D}_A = \lim_{t \rightarrow +\infty} \left( \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

La  $\mathcal{D}_A$  viene generalmente espressa in funzione del tempo medio al guasto ( $MTBF$ ) e del tempo medio di riparazione ( $MTTR$ )<sup>27</sup> come segue:

$$\mathcal{D}_A = \frac{\frac{1}{MTTR}}{\frac{1}{MTBF} + \frac{1}{MTTR}} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

---

<sup>27</sup>

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}; \quad MTTR = \frac{1}{\mu}$$



## Capitolo 2

# RCM — Manutenzione mirata all'affidabilità

La direzione aziendale si attende dal management della manutenzione prestazioni sempre migliori degli impianti e, nello stesso tempo, la riduzione dei costi della manutenzione. A tal fine occorre finalizzare molto bene le azioni manutentive che l'evoluzione delle sollecitazioni sui componenti richiede, arrivando a conoscere e a dominare il binomio causa effetto. Questo è lo scopo della metodologia RCM, che si pone come uno degli strumenti di programmazione più avanzati della manutenzione.

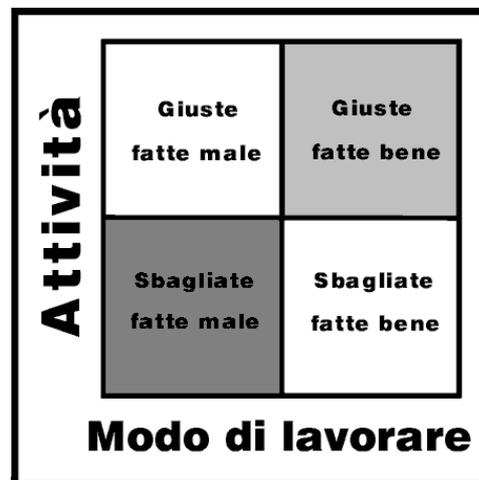


Figura 2.1: Matrice di eccellenza della manutenzione

L'ingegneria di manutenzione deve essere capace di operare sia in campo a supporto degli operativi, per guidarne le attività e raccogliere gli elementi

informativi necessari, sia al calcolatore, per creare ed utilizzare software capaci di effettuare tutte le elaborazioni più opportune.

Si osservi la matrice delle attività di figura 2.1; gli interventi di manutenzione devono essere rigorosamente fatti bene, cioè efficienti, e devono essere rigorosamente utili, cioè efficaci, pena l'insostenibile spreco delle risorse. In tal senso, la metodologia RCM rappresenta lo strumento ottimo per raggiungere l'eccellenza nella manutenzione; l'eccellenza manutentiva non è, diviene!

## 2.1 Storia della manutenzione e stato dell'arte

Qualsiasi attrezzatura (macchina, apparecchiatura, fabbricato . . . ) presenta una naturale tendenza ad invecchiare ed usurarsi con il passare del tempo, diminuendo conseguentemente la propria efficienza. In tal senso la manutenzione può essere vista come l'insieme delle attività atte alla conservazione delle caratteristiche di efficienza e di disponibilità di un bene.

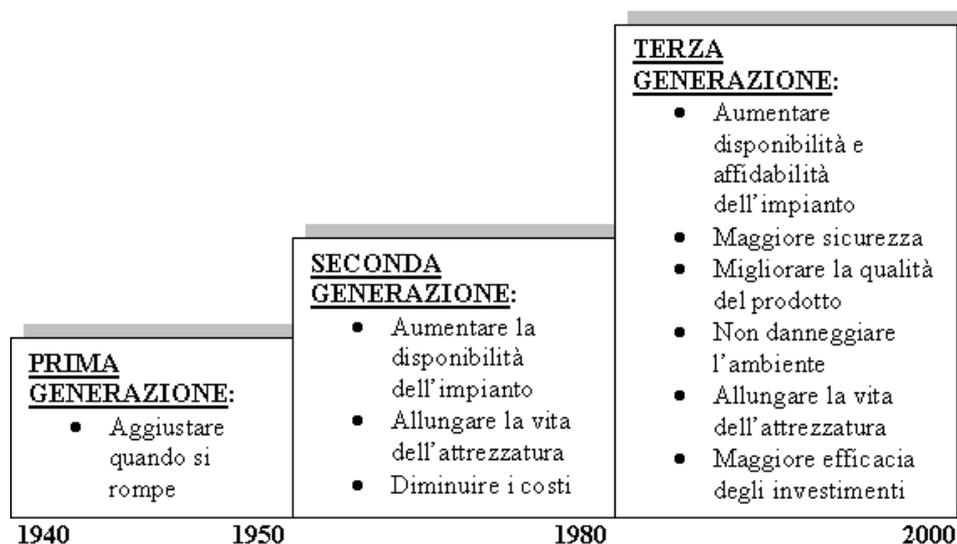


Figura 2.2: Evoluzione storica dei requisiti di manutenzione

Sebbene tale funzione fosse chiara, come si vede in figura 2.2, l'industria solo di recente ha compreso la sua importanza strategica, tanto che la manutenzione industriale è ancora oggi di incerta collocazione nell'organigramma delle aziende. L'unità organizzativa aziendale che ne rappresenta le funzioni è comunque subordinata alle unità di produzione e quindi ne deve assecondare le esigenze. La razionalizzazione dei processi produttivi, dovuta alle crescenti complessità delle lavorazioni e delle macchine, ha comunque for-

nito alle attività secondarie alla produzione (tra cui la manutenzione) una diversa dimensione, che non le considera più semplici attività produttrici di costi, ma mezzi indispensabili per raggiungere gli obiettivi di produzione aziendali.

Scopo della manutenzione è anche produrre sulla base del più basso livello di costi possibile, razionalizzando le risorse e concorrendo a rendere la gestione sempre più competitiva. Massimizzare il fattore di utilizzo delle attrezzature ed il mantenimento costante del loro livello di produttività sono obiettivi primari in una gestione vincente dell'impresa industriale, per cui la manutenzione diventa essenziale per garantire la massima efficacia ed efficienza della produzione.

Lo sviluppo storico della manutenzione ha seguito di pari passo l'evoluzione dell'automazione industriale, con gli apporti più significativi che provengono dai settori siderurgico, chimico, petrolchimico, nucleare ed aeronautico. Nell'industria siderurgica, nell'ambito della ripresa economica successiva alla seconda guerra mondiale, lo scopo fondamentale era produrre in larga scala nei minimi tempi tecnici, per cui la disponibilità delle macchine veniva ad assumere una importanza primaria, e conseguentemente si cominciavano ad approfondire i concetti, le politiche e la tecnologia della manutenzione. L'industria chimica ha fornito un fondamentale apporto allo sviluppo delle tecniche più sofisticate di manutenzione, dovendo operare nelle condizioni critiche di alte pressioni ed alte temperature, con materiali nocivi. Le esigenze di elevata produttività dell'industria petrolchimica, hanno portato ad un elevato grado di automazione e allo sviluppo di politiche di manutenzione sotto condizione, connesse a tecniche di controllo e di diagnostica dei macchinari. Le industrie nucleare ed aeronautica, infine, hanno promosso l'applicazione delle teorie di affidabilità e gli studi di valutazione probabilistica del rischio, che hanno portato un apporto fondamentale nello studio sistematico dei guasti.

Negli ultimi anni, l'automazione nel campo dell'industria manifatturiera ha portato a considerare l'importanza della manutenzione anche in questo settore. Nel passaggio dall'era industriale a quella postindustriale l'esigenza di mantenere l'efficienza degli impianti prevale rispetto alla tendenza a svilupparli, e la manutenzione assume un ruolo di primaria importanza. Il concetto di manutenzione viene ad essere associato ad esigenze di sicurezza, di protezione ambientale, di affidabilità, e gli impianti cominciano ad essere concepiti e progettati sulla base di tali requisiti ritenuti ormai essenziali. In tal senso, lo sviluppo dei metodi di Ingegneria dell'affidabilità ha contribuito in modo determinante a fornire una più appropriata collocazione scientifica alle attività di manutenzione.

Dal punto di vista della direzione aziendale, inoltre, la manutenzione

è uno dei parametri su cui poter intervenire per il controllo dei costi,<sup>1</sup> e questo ha contribuito notevolmente all'evoluzione di 'filosofie' di manutenzione basate sull'ottimizzazione dei risultati tecnici ed economici.<sup>2</sup> Tale evoluzione ha cambiato completamente il concetto di manutenzione, da semplice attività di intervento correttivo, all'insieme di attività programmate necessarie ad assicurare un buono stato di conservazione ed un regolare funzionamento degli impianti. Oggi esistono diverse scuole di pensiero per la manutenzione,<sup>3</sup> applicabili a diversi livelli in funzione delle reali esigenze; si tratta di schemi, procedure e metodi che nella pratica sono mescolati tra loro, portando all'uso di sistemi di manutenzione ibridi.

Non esiste, in generale, un approccio manutentivo in assoluto preferibile ad altri, in quanto ogni sistema produttivo rappresenta un caso a sè, con le sue particolari problematiche. Per logica conseguenza ne segue che la varietà delle macchine all'interno di un impianto porta all'adozione di politiche differenziate. In particolare il TPM, modello di derivazione giapponese che si presenta come sistema di manutenzione per la produttività, si prefigge l'obiettivo di migliorare continuamente l'efficienza degli impianti di produzione. La sottile peculiarità del modello, che ne costituisce il punto di forza, consiste in una politica gestionale che non si limita al mero ripristino della funzionalità, ma che dedica il massimo degli sforzi e delle risorse per eliminare le perdite dovute alle fermate, ai rallentamenti delle linee ed alle difettosità.

Il livello di manutenzione che si vuole raggiungere, è il risultato di un processo decisionale articolato e complesso, che tiene conto di tutti i possibili fattori che coinvolgono le macchine oggetto di manutenzione:

- caratteristiche tecniche
- importanza nel ciclo produttivo
- prolungamento del servizio
- sicurezza
- salvaguardia dell'ambiente
- assunzione di maggiori rischi produttivi per margini di contribuzione bassi
- studio delle condizioni di funzionamento degradato e della dinamica dei guasti

---

<sup>1</sup>Diversamente dal costo del lavoro e delle materie prime che sono dipendenti da fattori esterni e quindi presentano ridottissimi margini di intervento.

<sup>2</sup>Esistono diversi indici di controllo dei risultati, fra i quali citiamo l'OEE — *Overall Equipment Efficiency*.

<sup>3</sup>Possiamo citare, fra le più interessanti, la TPM — *Total Productive Maintenance*.

- strumenti dell'analisi di affidabilità — *FMECA*, *FTA* ...

Osserviamo, per concludere, che le varie politiche manutentive, pur avendo in comune lo scopo di ottimizzare i risultati tecnici ed economici, si differenziano comunque sul livello del controllo di tali risultati, a seconda che assuma particolare rilievo l'affidabilità, sicurezza o la produttività.

## 2.2 Ingegneria di manutenzione

### 2.2.1 Manutenzione e manutenibilità

La manutenzione comprende l'insieme di attività volte a conservare o ripristinare lo stato di funzionamento di un componente, con il minimo dispendio di risorse. Dal punto di vista operativo, la manutenzione si suddivide in proattiva e correttiva.

La manutenzione correttiva, in genere nota come riparazione, viene eseguita dopo aver rilevato il guasto ed opera in modo tale da riportare il componente ad uno stato in cui sia nuovamente in grado di svolgere la funzione richiesta. In particolare le azioni di manutenzione correttiva comprendono la localizzazione e l'isolamento del guasto, lo smontaggio, la riparazione, il montaggio, il riallineamento ed eventuali controlli finali.

La manutenzione proattiva, al contrario, cerca di sfruttare al massimo le tecniche di prevenzione e di predizione dei guasti, attraverso l'utilizzo di opportuni sistemi di 'condition monitoring' e la programmazione di opportuni interventi ad intervalli prefissati, volti alla riduzione dei guasti da usura. L'intento della manutenzione proattiva consiste anche nella ricerca dei guasti nascosti, così detti in quanto interessando elementi ridondanti o sistemi di protezione, sono rilevabili solo durante l'esecuzione di apposite ispezioni.

Per semplificare i calcoli viene generalmente adottata l'ipotesi di considerare i componenti riparati identici ai componenti nuovi.<sup>4</sup>

La manutenibilità di un componente esprime la probabilità che gli interventi di manutenzione vengano completati entro le scadenze prefissate, secondo le procedure stabilite e con l'utilizzo di risorse contate.<sup>5</sup> Da un punto di vista formale la manutenibilità considera il componente immerso nel proprio ambiente di funzionamento e ne indica la facilità di manutenzione per data logistica e date risorse.<sup>6</sup>

---

<sup>4</sup>Approssimazione di tipo *as good as new*. In realtà, come vedremo nel capitolo 4, uno dei vantaggi della simulazione numerica consiste nella possibilità di considerare riparazioni con una certa percentuale di usura residua.

<sup>5</sup>In particolare pezzi di ricambio, strumenti e personale prefissati.

<sup>6</sup>Per fare un esempio sull'incidenza dell'ambiente e della missione del sistema, si consi-

I parametri più significativi che ci possono fornire delle misure legate al concetto di manutenibilità sono il MTTR (*Mean Time To Repair*) per il caso della manutenzione correttiva ed il MTTPM (*Mean Time To Preventive Maintenance*) nel caso della manutenzione proattiva. Meno noto è il MTBUR (*Mean Time Between Unscheduled Removals*), che fornisce indicazioni interessanti per valutare l'efficacia del piano di manutenzione.

Lo studio della manutenibilità dei sistemi e dei componenti deve essere introdotto già durante la fase di progettazione, secondo i canoni dell'ingegneria simultanea, attraverso lo sviluppo ed il sostegno di una cultura di manutenzione. Non per questo, tuttavia, saranno da trascurare le fasi di installazione e di supporto logistico del sistema, che sono invece fondamentali per conservare un elevato grado di manutenibilità nel tempo.

### 2.2.2 Supporto logistico e ricambi

Un corretto dimensionamento del supporto logistico garantisce l'utilizzo economico ed efficiente del sistema per il ciclo di vita previsto. L'efficacia del supporto è una diretta conseguenza dei benefici di una cultura di manutenzione validamente integrata nel progetto e nel post vendita.

Un aspetto stimolante per l'ingegneria di manutenzione è legato al crescente sviluppo tecnologico, che induce una rapida obsolescenza di macchine ed impianti. Diventa infatti indispensabile, quando il sistema esce di produzione, stimare correttamente la riserva di pezzi di ricambio destinati a servire la manutenzione sul lungo periodo. A tal fine è opportuno sviluppare dei modelli di analisi dei dati di guasto utili per una previsione dei ritorni dal campo.<sup>7</sup>

### 2.2.3 Disponibilità

Come abbiamo già visto, la disponibilità rappresenta l'estensione del concetto di affidabilità al caso dei sistemi riparabili. In particolare si definisce disponibilità istantanea la probabilità che il sistema sia in grado di svolgere la funzione richiesta, all'istante di tempo considerato e per date condizioni ambientali e logistiche.

Come è ovvio, assieme ai modi di guasto dei componenti occorre considerare altri fattori che influenzano in modo pesante la disponibilità, quali il supporto logistico ed il fattore umano. Al proposito è norma comune stabilire dei parametri di riferimento ideali, che permettono di calcolare il valore deri la manutenibilità di un aereo in volo, che è sensibilmente diversa dalla manutenibilità dello stesso velivolo a terra.

<sup>7</sup>Si veda, a titolo di esempio, l'applicazione del metodo MLE con modello di difettosità all'analisi dei dati di guasto presentata nella sezione 6.4.4.

di disponibilità intrinseca del sistema. Nel caso più semplice, considerando ipotesi molto pesanti quali ratei di guasto costanti, continua operabilità del sistema e completo rinnovo dei componenti riparati, la disponibilità istantanea converge rapidamente al valore asintotico seguente:

$$\mathcal{D} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

## 2.2.4 Sicurezza, rischio e livello di accettazione del rischio

La sicurezza esprime la capacità di un sistema di non causare danni. Naturalmente non possono essere tollerati danni alle persone, ma neanche danni significativi alle cose. Più in generale, la percezione di sicurezza di un sistema nasce dalla convinzione che non si possa ragionevolmente verificare alcun tipo di evento che provochi conseguenze inaccettabili, a seguito dell'uso corretto, dell'abuso o del guasto.

Dal punto di vista di analisi del rischio, si può notare che la sicurezza in condizioni di normale funzionamento è una conseguenza della prevenzione di incidenti. La sicurezza nell'abuso senza dolo o in condizioni di prestazioni degradate o di guasto, è invece una diretta conseguenza della sicurezza tecnica e dell'applicazione di metodologie di progettazione a danneggiamento tollerato e a guasto sicuro.<sup>8</sup>

Osserviamo che la prevenzione degli incidenti deve risolvere i problemi di sicurezza dovuti ad eventi certi (il funzionamento del sistema nelle condizioni operative previste è una certezza), descrivendo le procedure per il corretto e sicuro utilizzo della macchina e prevedendo le protezioni opportune. Al contrario, la sicurezza tecnica deve spesso confrontarsi con eventi rari, caratterizzati da forti incertezze sulla dinamica e sugli effetti. In tal senso, uno degli obiettivi può essere quello di valutare e migliorare la sicurezza intrinseca del sistema agli errori umani, ai sabotaggi, alle catastrofi naturali e a tutti gli eventi che esulano dalle ragionevoli norme di funzionamento progettuali.

Strettamente connessi al concetto di sicurezza tecnica sono il rischio ed il controllo del rischio, includendo le analisi di rischio e la soglia di accettabilità del rischio. Tipicamente interdisciplinari, queste tipologie di analisi<sup>9</sup> coinvolgono aspetti dell'ingegneria, della psicologia e della politica, volti alla scelta del livello di rischio che si è disposti ad accettare, ed alla conseguente valutazione dei requisiti tecnici, dei costi di impianto e degli sforzi di manutenzione che tale decisione comporta. In particolare è importante stabilire il giusto peso fra probabilità degli eventi e relativi effetti (conseguenze in ter-

---

<sup>8</sup>Introdotta secondo la notazione inglese *damage tolerant* e *fail safe*.

<sup>9</sup>In gergo anche PRA (*Probabilistic Risk Assessment*).

mini di danno).<sup>10</sup> Infine, per completezza di indagine, è opportuno condurre le analisi di rischio considerando anche le cause prime degli eventi incidentali e gli effetti a diversi livelli, da quello locale del componente o della macchina, fino al livello ultimo dell'utilizzatore, o dell'intera società che fruisce del servizio.

Concludiamo sottolineando l'importanza degli aspetti psicologici legati alla percezione del rischio e l'importanza di entrambe l'affidabilità e l'analisi di rischio, la prima volta a garantire il funzionamento del sistema e la seconda volta a garantirne il funzionamento in sicurezza.

## 2.3 Introduzione alla RCM

Dal punto di vista dell'ingegneria sono due gli aspetti che devono essere considerati per la direzione di un impianto: in primo luogo deve essere mantenuto efficiente ed in secondo luogo può essere necessario introdurre modifiche e migliorie saltuarie di prodotto, o di processo. È opinione comune che sussista una distinzione di fondo tra il concetto di manutenzione, tipicamente indirizzato a ripristinare e a conservare uno stato esistente, ed il concetto di modifica e miglioria, che comporta il necessario cambiamento ed il riprogettato dello stato esistente. In tal senso si inserisce la nuova scuola di pensiero proposta dalla RCM.

La manutenzione non è più vista come il mantenimento di uno stato di funzionamento prefissato (quello previsto dal progetto, secondo cui il sistema è stato pensato e costruito), bensì viene definita come **l'insieme delle attività volte a far sì che il sistema continui a fare ciò che il suo utilizzatore desidera che faccia**. Se osserviamo che i desideri dell'utente sono legati alle condizioni ambientali e alla logistica, cioè al contesto operativo, possiamo allora definire la RCM come:

il processo volto a determinare i requisiti di manutenzione di un sistema nel suo contesto operativo.

L'intero processo di pensiero RCM viene sviluppato sulla base delle seguenti sette domande:

1. Quali sono le funzioni ed i relativi standard di funzionamento del sistema nel suo contesto operativo?
2. In quali modi il sistema può fallire la propria missione?

---

<sup>10</sup>Al proposito la regola di moltiplicazione  $Rischio = Probabilità \times Danno$  è la più utilizzata.

3. Quali sono le cause di ogni singolo guasto funzionale?
4. Quali le conseguenze?
5. Qual'è la gravità delle conseguenze?
6. Cosa si può fare per prevenire o predire ogni singolo guasto?
7. Cosa si dovrebbe fare nel caso di non fattibilità degli interventi proattivi?

Data l'estrema importanza, i concetti chiave delle sette domande di base, vengono discussi più in dettaglio qui di seguito

### 2.3.1 Funzioni e standard di funzionamento

Prima che sia possibile applicare la RCM per definire il piano di manutenzione necessario affinché il sistema sia in grado di fare ciò che i suoi utilizzatori desiderano che faccia, occorre risolvere i due problemi seguenti:

- capire cosa si desidera dal sistema
- assicurarsi che il sistema sia in grado di cominciare a farlo

Il primo passo nella RCM consiste dunque nel definire le funzioni del sistema nel suo contesto operativo, assieme alle prestazioni richieste. In particolare possiamo suddividere le esigenze degli utilizzatori in due categorie:

**funzioni primarie** giustificano l'acquisizione del sistema e definiscono specifiche tecniche quali produttività, velocità, capacità di trasporto o immagazzinamento, qualità di prodotto ...

**funzioni secondarie** riconoscono che ad una macchina o impianto viene generalmente richiesto qualcosa in più rispetto alle sole prestazioni tecniche. In particolare i clienti hanno aspettative di sicurezza, controllo e protezione, ergonomia, integrità strutturale, economia, efficienza operativa, conformità alle norme vigenti e di salvaguardia dell'ambiente, design ...

Non si trascuri l'importanza di questa prima fase di analisi funzionale, che svolta propriamente, con la stretta collaborazione degli utilizzatori del sistema, può richiedere fino a un terzo del tempo necessario a completare l'intero processo RCM. I primi risultati si possono già consolidare nei termini di acquisizione di una mole considerevole di informazioni sul funzionamento del sistema.

### 2.3.2 Guasti funzionali

Ricordiamo che, secondo la logica della RCM, il piano di manutenzione deve essere tale da conservare la capacità del sistema di fare fronte alla funzione richiesta dagli utenti con le prestazioni volute. In tal senso la manutenzione deve occuparsi dei soli eventi di guasto tali da compromettere la soddisfazione dell'utilizzatore: i guasti funzionali.

Si noti che esiste una sottile ma importante differenza fra guasti e guasti funzionali, essendo i primi legati agli inconvenienti tecnici ed i secondi alla mancata soddisfazione del cliente. Per inciso, la definizione di guasto funzionale prende in considerazione anche le condizioni di guasto parziale, tali da non mettere in crisi il sistema, ma da farlo funzionare ad un livello di prestazioni degradato ed inaccettabile.

### 2.3.3 Modi di guasto e cause di guasto

Identificati i guasti funzionali occorre individuare le diverse modalità di guasto secondo cui il sistema può incorrere nella perdita di funzionalità. Per ogni singolo modo di guasto, infine, bisogna cercare di stabilire tutte le possibili cause. Un'analisi FMECA<sup>11</sup> può essere di grande utilità.

RCM INFORMATION WORKSHEET	ASSET	Boeing 747		System code	Facilitator	Date	Sheet n°
	SYSTEM	Landing system		Sub-System code	Auditor	Date	of
	SUB - SYSTEM	Nose gear		B 747 - 054 - 001	P. Morelli	24-05-2001	100
FUNCTION	FUNCTIONAL FAILURE	FAILURE MODE	FAILURE EFFECT				
1 Weight support for up to xx tons	A Unable to carry the load at all	1 Gear axel broken	Crash of the Aircraft nose down to the runway. Major damage to the system , possibility of injury or death for crew and passengers depending upon aircraft taxing (low speed) or aircraft taking off (high speed) Take off delay or flight suppressed depending upon the downtime requested for repair (reasonably low expected). Minor delay for passengers if problem arises after landing. Same of above (downtim e for repair increases)				
2 Aircraft left turning or right turning during ground operations	A Unable to steer at all  B Steering malfunctioning	1 Flat or seized wheels  1 Right/Left turn actuators failure 2 Steering control system failure		Same of above (downtim e for repair increases)			

Figura 2.3: Scheda informativa RCM

Al termine di questa fase conviene raccogliere tutte le informazioni sulle funzioni, sui guasti funzionali e sui relativi modi di guasto in un'apposita struttura che si chiama foglio informativo. Il foglio informativo, di cui si mostra un esempio in figura 2.3, viene organizzato utilizzando un codice univoco per la identificazione del singolo modo di guasto, e deve contenere anche una prima sommaria descrizione degli effetti del guasto funzionale.

È importante mantenere una struttura ordinata e gestire un archivio

<sup>11</sup> *Failure Modes, Effects and Criticality Analysis.*

informatico di tali schede, che sarà di notevole utilità durante il processo decisionale (cfr. al 2.5.1).

### 2.3.4 Conseguenze dei guasti

La lista delle conseguenze, o effetti finali dei guasti funzionali, è di estrema importanza in quanto elemento discriminante nel processo di decisione delle strategie di manutenzione. In particolare la descrizione delle conseguenze dei guasti deve mettere in luce i seguenti aspetti:

- rilevabilità del guasto
- possibili danni a persone e cose
- possibili danni ambientali
- entità delle perdite di produzione
- procedure e costi di riparazione

Uno dei punti di forza della RCM consiste nel ritenere le conseguenze dei guasti di gran lunga più importanti rispetto alle caratteristiche tecniche. In tal senso, si riconosce che lo scopo degli interventi di manutenzione proattiva consiste nell'eliminare le conseguenze dei guasti, o almeno ridurne la gravità, piuttosto che ridurre la frequenza dei guasti stessi.

Per la loro importanza è quindi utile classificare le conseguenze dei guasti in quattro gruppi:

**Conseguenze dei guasti nascosti** i guasti nascosti che, ricordiamo, interessano le protezioni ed i componenti ridondanti, non presentano conseguenze dirette, ma espongono il sistema indebolito ai guasti multipli, ben più gravi e dalle conseguenze spesso catastrofiche.<sup>12</sup>

**Conseguenze sulla sicurezza e sull'ambiente** un guasto funzionale ricade in questa classe se può ferire o provocare la morte di qualcuno, oppure se può violare regolamenti di salvaguardia ambientale nazionali, internazionali o suggeriti dal buon senso.

**Conseguenze operative** nel caso in cui gli effetti del guasto influiscano negativamente sulla produttività, sulla qualità del prodotto, sul servizio alla clientela. In tutti i casi in cui si aggiungono costi operativi al costo di riparazione.

---

<sup>12</sup>Se così non fosse non sarebbe stato necessario prevedere le opportune ridondanze e protezioni!

**Conseguenze non operative** guasti che non hanno impatto sulla sicurezza, sull'ambiente o sulla produttività, il cui unico danno è rappresentato dal costo della riparazione.

Si noti che una suddivisione delle conseguenze dei guasti secondo le classi appena descritte aiuta il gruppo RCM a focalizzare la propria attenzione sui problemi di sicurezza e protezione dell'ambiente. Viene a cadere, inoltre, il preconetto di fondo secondo cui tutti i guasti sono dannosi e devono essere prevenuti. Il processo RCM aggredisce i guasti funzionali che impattano in modo violento le prestazioni del sistema, distogliendo le preziose energie di studio e di programmazione dai guasti che producono effetti minori o nulli.

Si mostra nella tabella 2.1 la scelta della corretta tipologia di intervento manutentivo relativo alle quattro classi di conseguenze dei guasti funzionali.

Conseguenze dei guasti funzionali	Interventi manutentivi proposti
Guasti nascosti	manutenzione proattiva (se tecnicamente fattibile e se riduce il rischio dei guasti multipli). In seconda istanza è possibile implementare la ricerca periodica dei guasti nascosti. In ultima analisi, e sulla base della gravità dei guasti multipli, occorre fare ricorso alla riprogettazione.
Sicurezza e ambiente	manutenzione proattiva, con lo scopo di eliminare il rischio di guasto, o ridurlo a livelli molto bassi. Se non tecnicamente fattibile è obbligatorio riprogettare il prodotto o il processo.
Operative	manutenzione proattiva, se economicamente conveniente rispetto ai costi di riparazione e di perdita di produttività. In caso contrario manutenzione al guasto. L'intervento manutentivo viene scelto sulla base di valutazioni economiche.
Non operative	manutenzione proattiva, se economicamente conveniente sui costi di sola riparazione. In caso contrario manutenzione al guasto.

Tabella 2.1: Conseguenze dei guasti funzionali e interventi manutentivi proposti

Concludiamo osservando che la manutenzione proattiva è prevista solo dove si rende strettamente indispensabile o dove risulta economicamente conveniente. Questa politica tende ad alleggerire il carico di lavoro di routine dei normali sistemi di manutenzione, che insistono molto sulla prevenzione

anche quando non serve. Il vantaggio, oltre all'ottimizzazione delle risorse, consiste nella migliore qualità nell'esecuzione degli interventi proattivi.

### 2.3.5 Risultati della RCM

A conclusione di questa sezione introduttiva sulla metodologia RCM, presentiamo gli obiettivi che si possono raggiungere:

**Maggiore sicurezza e rispetto dell'ambiente** la RCM tiene in debita considerazione le implicazioni sulla sicurezza e l'impatto ambientale di ogni singolo modo di guasto, contribuendo a consolidare l'attitudine alla sicurezza.

**Migliori prestazioni di sistema** la RCM riconosce valore a tutti gli interventi di manutenzione, che vengono pertanto introdotti dove servono realmente. Questo assicura la miglior politica di intervento per ogni sistema, compreso le eventuali riprogettazioni, nei casi in cui nessuna procedura di manutenzione risulti fattibile. In tal senso le prestazioni del sistema possono ricevere sensibili incrementi.

**Massima efficacia manutentiva** la RCM insiste in continuazione sulle procedure che inducono i migliori benefici al sistema e questo assicura che tutto ciò che viene speso per la manutenzione sarà investito dove può produrre il massimo ritorno. In tal senso viene ottimizzato il rapporto costi / efficacia.

**Archivio esaustivo di dati e procedure** la RCM sfrutta dei fogli informativi specifici per ogni singola fase del processo facilmente archiviabili in un sistema informatico per facilitare la stesura delle procedure e dei manuali di manutenzione, le revisioni manutentive a seguito di variazioni nel prodotto o nel processo produttivo, la gestione del magazzino e della squadra di manutenzione.

**Maggiore motivazione dei singoli** la RCM viene condotta coinvolgendo gli utilizzatori del sistema, la direzione aziendale e la manodopera di manutenzione, con l'effetto di produrre una responsabilizzazione interna ed una fiducia duratura nelle procedure stabilite.

**Migliore lavoro di squadra** è una diretta conseguenza del punto precedente, dell'introduzione di uno stesso linguaggio tecnico di riferimento e della diffusione di una stessa scuola di pensiero manutentivo.

Se correttamente applicata, la RCM può risultare un processo di pianificazione efficiente, efficace e rapido!

## 2.4 Strategie di manutenzione

### 2.4.1 Manutenzione Correttiva

È il tipo di manutenzione più semplice, in quanto non richiede la pianificazione delle attività. Come è noto si attende il manifestarsi del guasto e si procede alla riparazione delle parti danneggiate. Lo scopo consiste nel riportare la macchina in uno stato in cui possa svolgere le funzioni richieste.

I problemi legati all'uso di questa strategia manutentiva sono fortemente connessi all'imprevedibilità dei guasti, in termini di tempo ed effetti. In funzione della gravità, un guasto può provocare danni ad altre parti della macchina o del sistema, a persone e all'ambiente, e tipicamente si manifesta in tempi e luoghi non opportuni. È quindi necessario assicurarsi che le conseguenze dei guasti non possano assumere, sotto alcuna condizione, dimensioni inaccettabili.

Fino alla fine degli anni settanta il mondo industriale si trovava ad operare, per la maggiore, con questo tipo di politica manutentiva. Oggi questa approccio si definisce 'isterico', ma è tutt'altro che obsoleto e rimane per molti casi la soluzione più conveniente. Giova ricordare, al proposito, che un intervento di manutenzione programmata può provocare più danni che benefici, se pensiamo alla possibilità di introdurre cause ulteriori di guasto dovute ad errori umani nelle procedure di intervento e di assemblaggio delle macchine.<sup>13</sup>

La manutenzione a rottura trova ampio campo di impiego quando non sussiste alcun vantaggio economico, o quando non sussistono le condizioni di fattibilità tecnica per intraprendere una campagna di controllo e prevenzione dei guasti. Il compito primario di questa metodologia di manutenzione consiste, quindi, nell'individuare il metodo più efficiente ed efficace di riparazione del guasto, per ricondurre la macchina alle condizioni di funzionamento accettabili, con il minimo spreco di risorse possibile.

### 2.4.2 Manutenzione Proattiva — Preventiva

Abbiamo visto che la politica di manutenzione a guasto non permette alcuna pianificazione delle attività di manutenzione e di controllo della produzione. Fra i problemi principali abbiamo considerato i costi elevati, gli arresti non previsti, le ore di straordinario e i danni non prevedibili, che paradossalmente conducono alla fastidiosa situazione in cui sono le macchine a programmare la vita dei responsabili di manutenzione e non il viceversa.

---

<sup>13</sup>Un intervento di manutenzione preventiva è in ogni caso un evento perturbatore per un sistema che sta funzionando in una configurazione stabile.

Da queste considerazioni nasce un altro approccio alla manutenzione, il cui scopo consiste nel mantenere l'efficienza delle macchine introducendo appositi piani di interventi per la prevenzione dei guasti.

La manutenzione preventiva rappresenta un primo tentativo di controllo dei guasti, essenziale nei casi in cui non vi sia la possibilità di introdurre ridondanze per macchine di un certo rilievo, i cui malfunzionamenti improvvisi possano provocare ingenti danni economici. Questo tipo di manutenzione ha trovato terreno fertile nell'ambiente aeronautico, dove l'eventualità di guasti catastrofici, seppur rara, obbliga alla massima attenzione nei confronti della prevenzione. Si è andata poi affermando in impianti di notevoli dimensioni e di elevato costo, tipicamente monolinea, nei quali la disposizione in serie delle macchine rende critico l'arresto anche di una singola stazione di lavoro.<sup>14</sup> In particolare, il costo delle perdite di produzione può diventare insostenibile nei casi di installazioni in serie, di elevata capacità produttiva e con prodotti ad alto valore aggiunto.

La manutenzione preventiva contempla interventi programmati ad intervalli di tempo prefissati, al fine di abbattere la probabilità di rottura del componente. In particolare, in aggiunta agli interventi ordinari, o di 'routine', sono previste manutenzioni secondo le opportune scadenze e periodicità suggerite dai costruttori. Al riguardo, occorre tenere presente che non sempre il tempo è il parametro di riferimento per la programmazione delle frequenze di intervento. Spesso conviene scegliere altri parametri, che siano adeguatamente rappresentativi dell'usura del componente.<sup>15</sup>

Come è naturale aspettarsi, l'introduzione della manutenzione preventiva richiede un certo sforzo di pianificazione e di gestione, per cui diventa necessario dotarsi di adeguati software CMMS<sup>16</sup> integrati nella rete informatica aziendale. Di più, aspetto questo fondamentale a cui non sempre si attribuisce la giusta importanza, occorre curare la formazione del personale ed organizzare le procedure di lavoro per motivare e diffondere la nuova mentalità di approccio ai problemi manutentivi.

Dal punto di vista prettamente tecnico, la manutenzione preventiva risulta tanto più efficace quanto più la macchina, o il componente specifico, tendono a risentire dei fenomeni di usura ed 'invecchiamento', presentando un rateo di guasto crescente nel tempo secondo gli andamenti A, B o C rappresentati in figura 2.4. L'ipotesi che sta alla base del metodo assume che la frequenza dei guasti sia inizialmente bassa per poi aumentare con il tempo, per cui la sostituzione preventiva garantisce una reale riduzione dei guasti. Per fare un esempio di componenti soggetti ad una forte usura

---

<sup>14</sup>Si prenda l'esempio delle catene di processo negli impianti chimici.

<sup>15</sup>Percorrenze chilometriche di un veicolo, *scram* di un reattore nucleare, energia assorbita da una macchina elettrica ...

<sup>16</sup>*Computerised Maintenance Management Systems.*

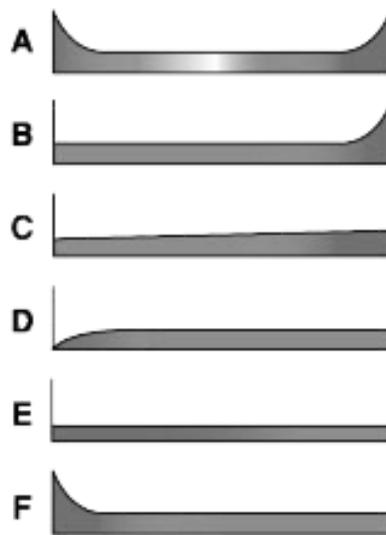


Figura 2.4: Tipologie del rateo di guasto in funzione del tempo

nel tempo, con rateo di guasto del tipo B di figura 2.4, possiamo citare i cuscinetti ad attrito radente, le pastiglie dei freni ed in generale i sistemi che sfruttano l'attrito, i frantoi, i rulli trasportatori, le giranti di pompe, i refrattari dei forni . . .

In molti casi, tuttavia, l'andamento della frequenza dei guasti non è sempre crescente con il tempo. Dalle ricerche di alcune compagnie aeree statunitensi, risulta che un'alta percentuale dei componenti aeronautici presenta un'elevata frequenza di guasti precoci (in gergo 'guasti infantili'), che tende poi a decrescere con il tempo, per portarsi ad un valore pressochè costante, secondo l'andamento F di figura 2.4. Effettuare interventi di manutenzione preventiva in questi casi è estremamente dannoso in quanto si riporta il rateo di guasto ai valori iniziali elevati, con una conseguente riduzione dell'affidabilità (si veda lo schema di figura 2.5). A questa fonte di errore, dovuta alla cattiva progettazione della manutenzione, si aggiunge il rischio di errori operativi del personale di manutenzione durante le procedure di smontaggio e montaggio richieste. Non è infrequente rilevare, a seguito di avviamenti successivi ad interventi manutentivi, problemi prima inesistenti.

L'aspetto più interessante e delicato del sistema è la scelta dell'intervallo di tempo ottimo  $\Delta T$  tra due successive fermate per manutenzione. Il tempo di funzionamento al guasto è una variabile aleatoria che dipende principalmente dalle condizioni operative della macchina e dallo stato specifico dei suoi componenti, e che può essere descritta da una funzione densità di probabilità di guasto del tipo rappresentato in figura 2.6.

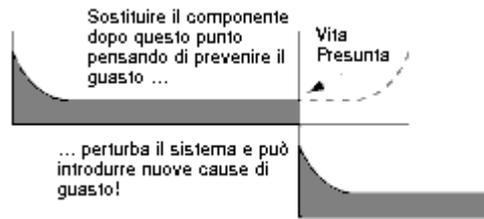


Figura 2.5: Perturbazione di un sistema stabile

Dal punto di vista pratico, il parametro statistico più facilmente misurabile è il tempo medio al guasto, in gergo MTBF.<sup>17</sup> Il primo rozzo tentativo, ci porterebbe quindi ad utilizzare una regola di proporzionalità diretta del tipo:

$$\Delta T \propto MTBF$$

che non tiene però conto della particolare forma della  $f(t)$ , che può anche essere fortemente asimmetrica, e della varianza dei dati sperimentali. Il MTBF da solo non fornisce una misura dell'affidabilità del componente, tanto è vero che, al contrario di quanto si potrebbe pensare di primo acchito, la probabilità di guasto per un tempo di funzionamento pari al MTBF non è necessariamente del 50%!<sup>18</sup>

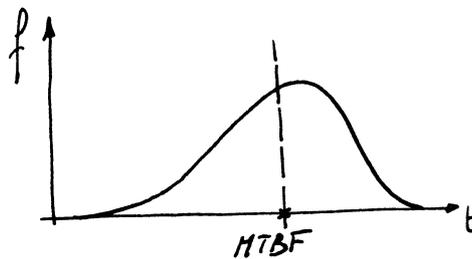


Figura 2.6: Funzione densità di probabilità di guasto

La metodologia corretta, che richiede però un maggiore impegno nell'analisi dei dati grezzi secondo i metodi presentati nel capitolo 6, consiste nella seguente procedura:

<sup>17</sup> *Mean Time Between Failures.*

<sup>18</sup> Per esempio il caso della comune distribuzione esponenziale  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$  per cui vale:

$$\mathcal{F}(MTBF) = \int_0^{MTBF} \lambda e^{-\lambda t} dt \cong 63\%$$

- stima della distribuzione di probabilità che meglio approssima i dati sperimentali e valutazione della banda di confidenza.
- scelta del valore limite  $\tilde{p}$ , o valore di soglia della probabilità di guasto, che si è disposti ad accettare durante il periodo di funzionamento della macchina tra due manutenzioni successive.<sup>19</sup>
- il  $\Delta T$  viene finalmente calcolato come segue:

$$\Delta T = \mathcal{F}^{-1}(\tilde{p})$$

Osserviamo, per concludere, che tanto più piccola si sceglie  $\tilde{p}$  e tanto maggiori saranno la frequenza ed i costi di manutenzione. Non si avrà, inoltre, la certezza di avere eliminato i guasti.

In ultima analisi, sebbene questo metodo di manutenzione rappresenti un buon passo in avanti rispetto alla manutenzione correttiva verso una limitazione del numero di fermate e una programmazione delle attività, non risultano soddisfatti in modo ottimale i requisiti di sicurezza, affidabilità e produttività.

### 2.4.3 Manutenzione Proattiva — Predittiva

La possibilità di gestire la manutenzione proattiva conoscendo le reali condizioni operative delle macchine aumenterebbe in modo rilevante la sua efficienza. In tal caso, infatti, gli interventi non sarebbero più pianificati ad intervalli regolari, ma sulla base delle reali condizioni di funzionamento. Questo tipo di manutenzione, detta manutenzione sotto condizione, costituisce una ulteriore evoluzione rispetto alla manutenzione preventiva ‘cieca’.

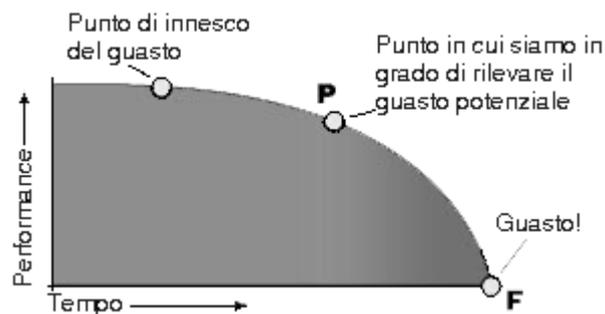


Figura 2.7: Condition monitoring, curva di evoluzione dei guasti potenziali

<sup>19</sup>Nell'ipotesi 'as good as new'.

La manutenzione sotto condizione assicura l'efficienza delle macchine in base al controllo ordinario e continuo delle loro condizioni durante il funzionamento.

Naturalmente occorrono studi di fattibilità tecnica volti a valutare l'esistenza di parametri fisici misurabili che possano essere ricondotti alla stima della resistenza meccanica dei componenti oppure all'integrità strutturale. Come si vede in figura 2.7, la caratteristica desiderabile di questi parametri è quella di essere sintomi chiari e facilmente rilevabili del degrado di prestazioni della macchina. A seguito dell'innesco del guasto, infatti, il parametro deve deviare dalla condizione di normalità fino al punto in cui lo scostamento è tale da essere rilevato dalla strumentazione di controllo, che lancia il segnale d'allarme.

La manutenzione condizionale deve essere implementata quando le esigenze di sicurezza e protezione ambientale lo richiedono, se è tecnicamente fattibile e se il margine di tempo che intercorre tra la rilevazione della condizione di preguasto ed il guasto stesso (intervallo  $P \mapsto F$ ) consente l'evacuazione del personale o la riparazione preventiva. In figura 2.8 si mostra come deve essere programmata la frequenza di ispezione, nei casi in cui non sia fattibile il controllo del parametro in continuo, al fine di garantire un intervallo di tempo sufficiente per l'intervento.

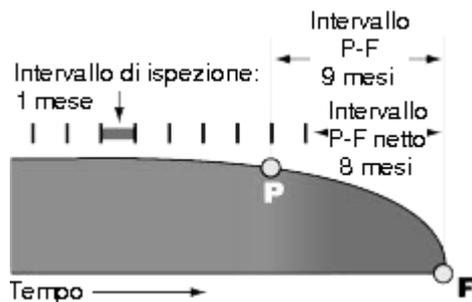


Figura 2.8: Frequenza delle ispezioni e intervallo  $P \mapsto F$  netto

Per l'organizzazione di un piano di manutenzione su condizione è quindi necessario conoscere il tipo di parametro misurabile e la dinamica del segnale quando la macchina entra in una situazione di guasto potenziale. Le tecniche di ascolto dei componenti si dividono in 'analisi della tendenza' e 'controllo della condizione'.

**L'analisi della tendenza** consiste nella misura e nell'interpretazione dei dati durante il normale funzionamento, in modo da rilevare variazioni significative dei parametri presi a caratterizzare lo stato di salute della macchina e dei suoi componenti. Lo scopo dell'analisi consiste nello

stabilire il momento in cui il degrado raggiunge dimensioni critiche. Studiando l'andamento delle misurazioni acquisite ad intervalli regolari, è possibile estrapolare le informazioni di tendenza per ottenere una segnalazione tempestiva del difetto. Il livello di soglia deve essere fissato in modo da garantire un buon preavviso di fermata, senza provocare inutili allarmismi.

**Il controllo della condizione** si avvale di una serie di misurazioni dei parametri di funzionamento, eseguite senza una particolare regolarità. Tali misure vengono assunte come indicatori dello stato di salute della macchina. In tal senso si opera un confronto con valori tipici suggeriti dalle normative, oppure con gli stessi parametri di riferimento di macchine simili. Le principali tecnologie utilizzate sono l'analisi in ampiezza e frequenza delle vibrazioni, l'andamento delle temperature, le analisi chimiche sulle percentuali dei residui negli oli lubrificanti, le scansioni ad ultrasuoni, le misure dei flussi elettromagnetici accoppiati ai motori elettrici . . .

Per realizzare una politica di manutenzione secondo condizione, è necessaria un'apposita organizzazione finalizzata all'esame sistematico dei singoli componenti delle macchine, che sostituisce a tutti gli effetti gli intervalli fissi di revisione tipici nella manutenzione preventiva. Gli interventi manutentivi infatti restano subordinati al risultato delle analisi.

I risultati principali che si ottengono implementando le tecniche di 'condition monitoring' si apprezzano sia per la possibilità di disporre di opportuni tempi di preavviso sui guasti, sia sul maggior contenuto di informazioni disponibili sul funzionamento delle macchine grazie all'elaborazione dei dati di ispezione.

I vantaggi che ne scaturiscono sono molteplici. In primo luogo, una politica di manutenzione su condizione bene organizzata e validamente sostenuta da accurati modelli predittivi, implica un elevato grado di sicurezza nell'esercizio dell'impianto. In secondo luogo, le migliori informazioni disponibili sul sistema ne permettono uno sfruttamento più accurato e performante. È inoltre possibile sfruttare i preavvisi di guasto per ottimizzare gli interventi in linea, massimizzando la disponibilità complessiva e la produttività. Di più, le informazioni sullo stato della macchina snelliscono la procedura di riparazione rendendo l'intervento più efficace e più efficiente. È chiaro, inoltre che si possono avere grossi benefici anche a livello di gestione del magazzino, grazie alla possibilità di conoscere con un certo anticipo i soli pezzi di ricambio necessari al prossimo intervento. In ultimo, ma non per importanza, si deve considerare il raggiungimento di una migliore qualità del prodotto (o del servizio), in quanto il controllo continuo delle macchine permette di ridurre significativamente gli scarti di lavorazione.

Il punto debole di questa filosofia di manutenzione è indubbiamente legato ai costi dei sistemi di controllo e di gestione dell'informazione, per cui si rivela opportuno destinare questo tipo di risorsa alle macchine e componenti più critici in termini di costi e di sicurezza. Affinchè il metodo sia efficacemente applicabile, inoltre, risulta indispensabile che il componente in esame sia soggetto a fenomenologie di guasti progressive e che permettano di apprezzarne l'evoluzione. Non è poi da trascurarsi l'affidabilità del sistema di controllo, che deve essere elevatissima per evitare falsi allarmi e per consolidare un atteggiamento di fiducia nei confronti del sistema stesso.<sup>20</sup> Infine è da tenere in seria considerazione il fatto che tale metodo prevede l'acquisizione di una notevole mole di dati, per cui risulta opportuno motivare adeguatamente il personale addetto a tale operazione.

#### 2.4.4 Ricerca dei guasti nascosti

La ricerca dei guasti nascosti costituisce un caso singolare delle attività di ispezioni manutentive. In particolare non viene indirizzata alla ricerca dei malfunzionamenti dei componenti, quanto al controllo del corretto funzionamento. Questa situazione si verifica nel caso dei sistemi di allarme o di protezione e per tutti i sistemi e gli strumenti ispettivi della politica di manutenzione su condizione. La tipologia di sistemi descritta, infatti, fa parte della classe dei sistemi passivi, perchè in condizioni normali non devono entrare in funzione.

I sistemi di protezione sono allora soggetti ai guasti nascosti, che restano latenti fino al momento del bisogno, quando si scopre troppo tardi che il sistema è malfunzionante e non risulta in grado di fare fronte alla situazione di emergenza.

La causa principale dei guasti latenti è dovuta all'incuria dei gestori del sistema, che per convenienza sono portati a non effettuare gli opportuni interventi di conservazione per i componenti passivi. Questo atteggiamento non è giustificabile, anche se è sperabile che tali componenti non debbano mai entrare in funzione. Esiste però una seconda causa di guasto dovuta all'esecuzione approssimativa delle prove e delle ispezioni di integrità, che dopo averne verificato il corretto funzionamento, danneggiano inavvertitamente il componente.

La direzione aziendale in prima linea, ma anche gli operatori di manutenzione, devono quindi essere fortemente e coscienziosamente motivati agli interventi di ricerca dei guasti nascosti. Di più occorre evitare, nei limiti del possibile, di perturbare tali sistemi di protezione per limitare la probabilità di causare danni accidentali.

---

<sup>20</sup>È tipico il caso dei sistemi di sicurezza che vengono appositamente disattivati per evitare di essere continuamente infastiditi dal ricorrere incessante di falsi allarmi.

### 2.4.5 Terotecnologia

Un miglioramento nella gestione globale della manutenzione può essere ottenuto, a questo punto, considerando non solo la singola riparazione di una macchina, bensì tutto il ‘ciclo di vita’. La terotecnologia applica, quindi, la combinazione più idonea di interventi al fine di ottimizzare i costi complessivi nell’arco dell’intero ciclo di vita del sistema, a partire dalla fase di progettazione fino alla dismissione. Ecco allora che già durante la fase progettuale acquistano sempre più importanza i concetti di affidabilità e di manutenibilità, anche e soprattutto in relazione alle prestazioni, ai costi di esercizio ed ai costi di investimento di capitale. Anche la procedura di installazione assume un ruolo diverso, nel senso che non resta più solo un periodo di collaudo esecutivo e tecnico, ma diventa anche un periodo di apprendimento. È in tale fase, infatti, che risulta possibile colmare le lacune progettuali localizzando i difetti nascosti che possono produrre effetti negativi sulla disponibilità della macchina, permettendo un’eventuale riprogettazione delle sue parti critiche prima della commercializzazione.

Durante tutto il ciclo operativo sarà utile e necessario promuovere l’utilizzo del sistema di acquisizione dati, proponendone anche eventuali sviluppi. Tale sistema sarà quindi attivo dalla fase di installazione della macchina fino a quella di dismissione, costituendo un prezioso flusso di informazioni non solo per il controllo, ma anche per la progettazione. In tale contesto la terotecnologia si rivela di notevole supporto in un sistema di manutenzione avanzato, consentendo l’aumento significativo della vita operativa delle macchine e dei componenti attraverso l’uso di vari mezzi:

- analisi delle cause di arresto
- ingegneria dell’affidabilità e della manutenzione
- installazione e riparazioni eccellenti; particolarmente riguardo ad allineamenti<sup>21</sup> ed equilibrature<sup>22</sup>
- specifiche di funzionamento sui componenti nuovi e sui componenti rigenerati<sup>23</sup>
- verifica delle prestazioni in fase di installazione e avviamento
- condition monitoring
- addestramento e motivazione del personale

---

<sup>21</sup>Non si trascuri l’efficacia di un corretto allineamento, che può allungare la vita dei cuscinetti fino ad 8 volte.

<sup>22</sup>Una corretta equilibratura riduce la rumorosità e le vibrazioni, migliorando le prestazioni delle macchine e delle guarnizioni.

<sup>23</sup>Riportati a ‘ore zero’ a seguito di manutenzione.

Le specifiche tecniche dei componenti revisionati sono importanti e devono essere redatte con cura, in quanto certificano che la riparazione è stata condotta in accordo ai requisiti di precisione stabiliti dalle norme.

Concludiamo sottolineando il valore aggiunto che le tecniche di simulazione numerica della manutenzione possono apportare ai modelli e metodi della terotecnologia.

#### 2.4.6 Riprogettazione

Nel caso in cui non sia possibile adottare alcuna delle politiche manutentive descritte in precedenza e gli effetti del guasto producano conseguenze tali da ledere la sicurezza e la salvaguardia ambientale, è doverosa la riprogettazione a livello di componente o anche di sistema, volta all'eliminazione della causa di guasto o alla riduzione dei suoi effetti.

È possibile ridurre, tuttavia, la probabilità di dovere affrontare un problema di riprogetto, se già durante la fase di progettazione si tengono in debita considerazione i seguenti punti:

- confronto con esperienze precedenti su sistemi simili
- corretta specifica degli obiettivi di prestazioni, affidabilità, manutenibilità, disponibilità, sicurezza, dei metri di definizione di tali obiettivi e del profilo di missione richiesto
- tentativi di allocazione delle risorse di affidabilità a livello di componenti elementari
- criticità dei sottosistemi e dei componenti
- eventuale disponibilità di studi comparativi<sup>24</sup>
- possibili problemi di interfaccia con il cliente
- potenziali problemi di sicurezza
- verifica della specifica di progetto con le reali esigenze di mercato
- richiesta di particolari requisiti ergonomici
- formalizzazione di una bozza di programma di manutenzione
- richiesta di particolari requisiti software
- indagine su eventuali brevetti esistenti e valutazione economica di acquisizione di licenze

---

<sup>24</sup>Per esempio valutazioni comparative di diversi prodotti o processi di fabbricazione.

- stime del costo di vita del prodotto e verifica di ottimizzazione dei costi nel rispetto dei requisiti di affidabilità, sicurezza e manutenibilità
- studio di fattibilità, valutazione della concorrenza e del proprio vantaggio competitivo
- pianificazione delle tempistiche di marketing, progettazione e produzione
- studio della logistica di commercializzazione e trasporto dei manufatti al consumatore

## 2.5 Il processo decisionale

La pianificazione delle attività di manutenzione viene assistita, secondo le linee guida della RCM, dal diagramma di decisione rappresentato in figura 2.9, attraverso un percorso di domande e risposte successive. Come abbiamo già avuto modo di osservare, la RCM focalizza la propria attenzione sulle conseguenze dei guasti; solo in un secondo momento la decisione di effettuare un particolare intervento è lasciata a valutazioni di fattibilità tecnica ed economica.

### 2.5.1 Il diagramma decisionale

Il diagramma, in particolare, permette di mettere in luce i seguenti aspetti:

- lavori di routine, relative frequenze e personale addetto
- guasti funzionali critici e tali da richiedere una revisione del progetto
- casi in cui si è deciso di non prevenire i guasti

Nella scelta delle opportune attività proattive suggerisce di preferire, quando possibile, un adeguato intervento predittivo, o di manutenzione condizionale, rispetto alla manutenzione preventiva.

I risultati vengono raccolti in una serie di schede decisionali del tipo rappresentato in figura 2.10. Per ogni guasto funzionale è presente un riferimento al relativo foglio informativo, di cui si rimanda all'esempio di figura 2.3, e l'integrazione fra le conseguenze del guasto e l'intervento manutentivo scelto dal gruppo RCM.

Analizziamo più in dettaglio il percorso del diagramma decisionale e la procedura corretta per compilare la relativa tabella. Le prime tre colonne, indicate con F, GF e CG fanno riferimento al codice identificativo

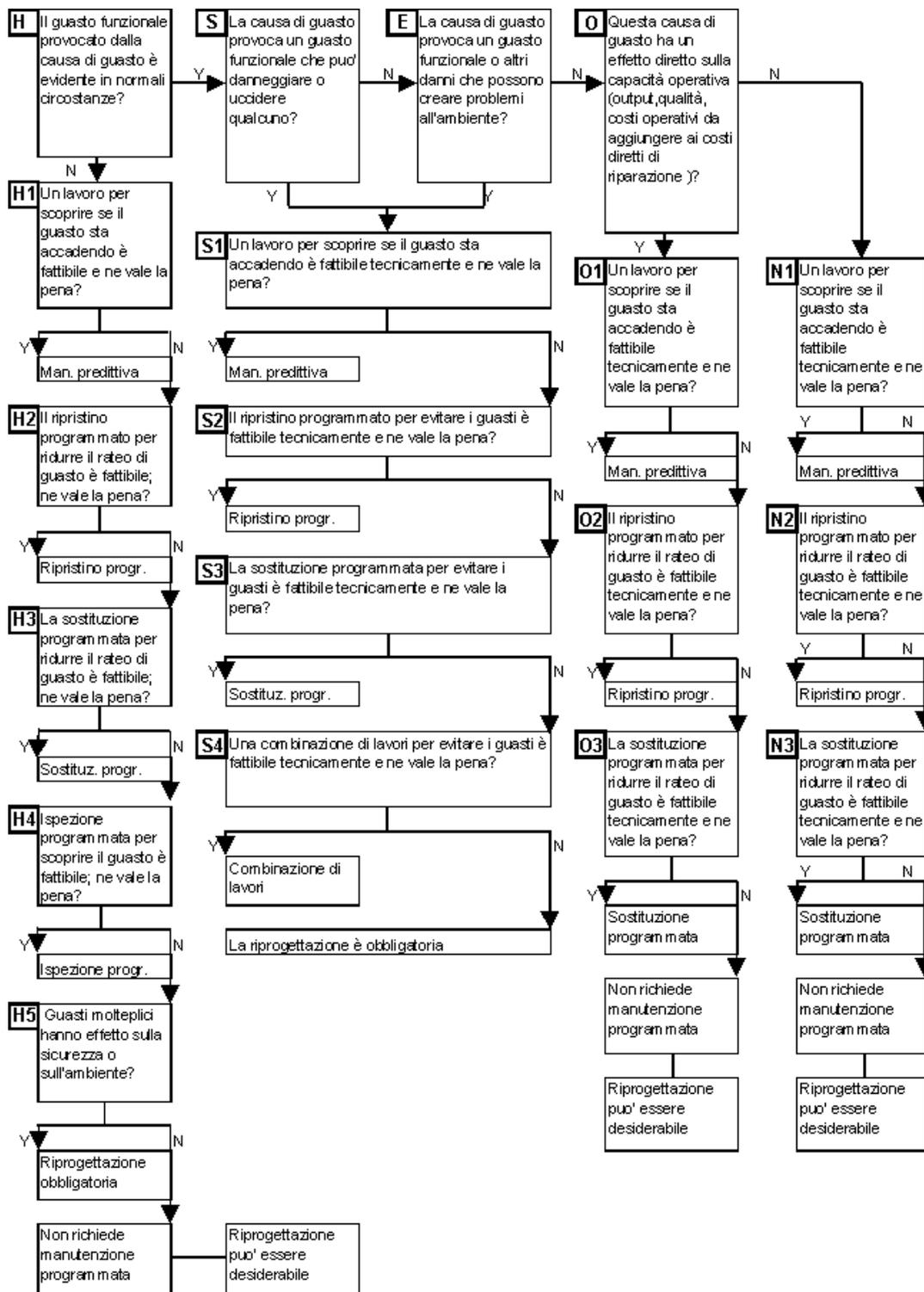


Figura 2.9: Diagramma di decisione delle attività della RCM

Informazioni di riferimento		Conseguenze di valutazione				Azioni mancanti				Intervallo:	Fatto da:												
F	GF	H	S	E	O	H1	H2	H3	H4			H5	H6	S4									
1	A	1	Y	N	N	Y	N	N	Y														
1	B	1	N				N	N	Y														
1	C	1	Y	N	N	Y	N	N	N														
1	C	2	N				Y																
1	C	3	Y	N	N	Y	N	Y															

RCM II TABELLA DI DECISIONE		SISTEMA (2): turbosfera (caldaia matene prime)		Facilitator:	Data:	Fogli n°:
		SISTEMA n°:	2			
		SCOTTOSISTEMA (6): filtro F50		Auditor:	Data:	di:
		Scottosistema n°:	6	A. Veraldi		
		Lavoro proposto		Intervallo:		
		Sostituzione programmata e ripistino		4 ore		
		Sostituzione programmata		3/4 cicli di 4 ore		
		Non richiede manutenzione programmata				
		Manutenzione programmata sotto condizione		6 mesi		
		Ripistino programmato		1 mese		
				Operatore		
				Operatore		
				Meccanico		
				Operatore		

Figura 2.10: Scheda del piano di manutenzione RCM

del guasto funzionale, che permette di individuarne il foglio informativo. Le abbreviazioni hanno il significato seguente:

**F** funzione

**GF** guasto funzionale

**CF** causa del guasto

Le dieci colonne successive fanno riferimento alle domande del diagramma di decisione e vengono così suddivise:

- le colonne **Hidden**, **Safety**, **Environment**, **Operational** vengono usate per registrare le risposte alle domande riguardanti le conseguenze di ciascuna causa di guasto
- le successive tre colonne indicano la possibilità di effettuare un intervento di tipo proattivo
- le colonne H4, H5, S4 indicano le azioni correttive, la riprogettazione e la ricerca dei guasti nascosti<sup>25</sup>
- le ultime tre colonne descrivono il lavoro scelto, la frequenza con cui deve essere svolto ed il personale adeguato al compito<sup>26</sup>

Osserviamo che ogni causa di guasto deve appartenere ad una singola categoria, scelta sulla base della criticità delle conseguenze. È tipico, infatti, il caso in cui un guasto che lede la sicurezza comporti anche perdite di produttività e quindi conseguenze operazionali.

Scelta l'appartenenza alla corretta categoria di conseguenze (a tal fine ci si può aiutare con il foglio informativo, che è già stato compilato con la descrizione degli effetti dei guasti funzionali), occorre studiare la possibile applicazione di attività proattive, compilando le seguenti colonne:

**H1 S1 O1 N1** indicano la fattibilità di un'adeguata manutenzione predittiva

**H2 S2 O2 N2** indicano la fattibilità di un intervento di manutenzione preventiva di *ripristino* programmato

**H3 S3 O3 N3** indicano la fattibilità di un intervento di manutenzione preventiva di *sostituzione* programmata

---

<sup>25</sup>Si noti che queste colonne devono essere compilate se non è possibile effettuare né la manutenzione condizionale né la manutenzione preventiva.

<sup>26</sup>In particolare, la colonna 'Lavoro proposto' viene anche usata per registrare i casi in cui sia necessaria la riprogettazione, o i casi in cui non si prevede alcuna azione (*run to failure*).

È necessario ricordare che un determinato tipo di manutenzione proattiva, così come viene specificata nelle tre colonne di cui sopra, è adeguato ed appropriato se e soltanto se, in ordine di importanza, risulta tecnicamente fattibile, a favore di sicurezza, economicamente vantaggioso.

### **2.5.2 Il personale addetto alle manutenzioni**

Concludiamo la descrizione del diagramma decisionale soffermandoci sull'ultima colonna della scheda di decisione, che deve indicare il personale addetto al singolo intervento di manutenzione. Per gli interventi molto frequenti, che sono generalmente le attività di ripristino quali la pulizia e la lubrificazione, è senza dubbio opportuno scegliere, sia dal punto di vista economico, sia dal punto di vista organizzativo e psicologico, gli operatori stessi adibiti al controllo o all'utilizzo delle attrezzature. Gli operatori sono, a tutti gli effetti, le persone più motivate allo scopo, sono gelosi delle 'loro' macchine e vengono gratificati quando sono responsabilizzati a prendersene cura.

Occorre tuttavia assicurarsi che siano soddisfatte le seguenti importanti condizioni:

- devono essere correttamente addestrati in modo da poter riconoscere le condizioni potenziali di guasto nel caso di manutenzione sotto condizione e devono essere istruiti sulle procedure per portare a termine in sicurezza le ispezioni sulle macchine in movimento.
- devono utilizzare procedure semplici ed affidabili per la registrazione dei guasti e delle condizioni di funzionamento degradato.
- devono essere certi che le loro indicazioni, fornite nelle schede di lavoro, siano attentamente prese in considerazione, con la possibilità di ricevere anche delle critiche costruttive.

### **2.5.3 Le schede di manutenzione**

Le procedure di manutenzione devono infine essere raccolte nelle opportune schede e presentate in modo chiaro e sintetico a coloro che dovranno eseguire gli interventi.

Le schede di manutenzione possono essere così suddivise:

1. schede compilate dagli operatori
2. schede predisposte dal controllo di qualità
3. schede compilate dai manutentori

Al primo gruppo appartengono le schede degli operatori, i quali, lavorando quotidianamente a contatto diretto con la macchina, si trovano nella condizione ideale per svolgere la maggior parte delle manutenzioni sotto condizione e dei ripristini programmati. Al secondo gruppo appartengono le schede predisposte dal controllo di qualità per l'osservazione delle prestazioni o del livello di qualità di prodotto. In tal senso, il controllo di qualità della produzione diventa uno strumento per rilevare guasti funzionali e condizioni di funzionamento degradate. In ultimo sono indicate le schede compilate dai manutentori, che a differenza degli operatori, hanno il compito di gestire la manutenzione per aree o linee di produzione, comprendendo queste più macchine e zone di lavoro estese.

## 2.6 RCM — Applicazione al caso Mydrin Finley

Presentiamo, in questa sezione, i risultati dell'applicazione della metodologia *Reliability Centred Maintenance* al caso dell'organizzazione delle strategie manutentive di una linea produttiva di collanti industriali.

### 2.6.1 Presentazione dell'azienda

L'azienda Mydrin Finley è una società del gruppo Bostik Total, leader nel mondo nel settore dei collanti industriali. In conformità alla politica del gruppo, l'azienda mantiene elevati livelli di qualità attraverso un costante investimento in tecnologia e ricerca, che permette di fornire sofisticate soluzioni personalizzate ai sempre più ambiziosi progetti d'incollaggio dei clienti. Attraverso l'alta qualità del servizio, la rapida assistenza tecnica, gli elevati standard produttivi, garantisce la sicurezza della continuità di fornitura.

L'azienda offre, dunque, un mix di prodotti e servizi così composto:

- ampia gamma di adesivi
- processi di produzione ad alto livello qualitativo
- alta qualità di servizio
- laboratori di ricerca e sviluppo
- rapida assistenza tecnica
- alta tecnologia
- flessibilità nella creazione di prodotti personalizzati
- investimenti per il miglioramento della tecnologia
- presenza sul mercato mondiale

## 2.6.2 Descrizione e schemi di impianto

La metodologia di manutenzione RCM è stata applicata ad un impianto meccanico utilizzato per la produzione di adesivi termofusibili, normalmente noti come *Hot Melt*, al fine di programmare il piano di manutenzione ottimo e redigere il manuale delle schede di manutenzione.

La linea di produzione in oggetto è relativamente moderna, in quanto entrata in funzione nell'aprile del 2000 ed è di particolare interesse per l'azienda, che sta organizzandosi per acquisire un nuovo impianto della stessa tipologia. Il lavoro si presenta quindi di ampio respiro, con la possibilità di essere adattato facilmente anche alla nuova linea produttiva.

Si veda in figura 2.11 lo schema dell'impianto considerato.

## 2.6.3 Analisi funzionale

L'analisi dell'impianto è stata effettuata previa suddivisione nei 9 sottosistemi funzionali elencati qui di seguito:

1. Caldaia riscaldamento olio diatermico
2. Turbosfera (caldaia materie prime)
3. Impianto di messa sottovuoto della turbosfera
4. Sistema tagliante
5. Impianto dell'acqua (secondario)
6. Vasca di raccolta
7. Impianto di essiccazione
8. Impianto refrigerazione acqua (primario)
9. Impianto aspirazione fumi e polveri

In particolare vengono utilizzate negli schemi le seguenti abbreviazioni:

**M** motore elettrico

**P** pompa

**V** valvole, elettrovalvole, valvole pneumatiche

**R** resistenze elettriche

**F** filtro



**T** misuratore di temperatura

**TS** termostato di sicurezza

**P** misuratore di pressione

**MP** misuratore di portata

**S** setaccio

Consideriamo, ora, il dettaglio dei singoli sottosistemi, descrivendone le funzioni principali e gli elementi che li compongono.

### Caldaia riscaldamento olio diatermico

L'olio diatermico viene riscaldato da resistenze elettriche, fino ad una temperatura di  $130 \div 150^{\circ}\text{C}$ ; mediante una pompa centrifuga viene inviato alla camicia della turbosfera (caldaia materie prime) al fine di sciogliere le materie prime presenti e amalgamarle nel prodotto finito.

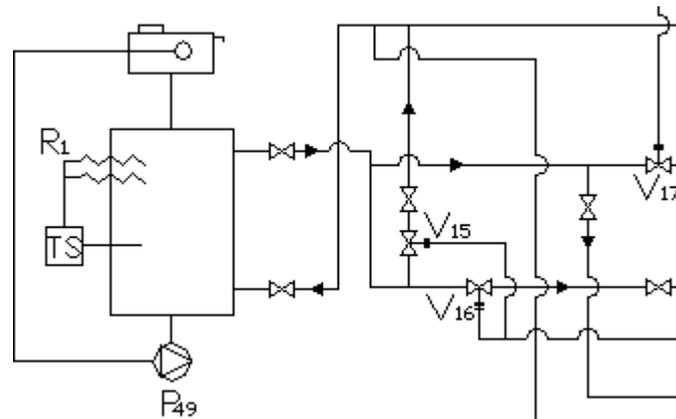


Figura 2.12: Caldaia per olio diatermico

Componenti del sistema:

- Pompa centrifuga P49 per ricircolo olio
- Resistenze elettriche R1
- Olio
- Elettrovalvola pneumatica V15
- Elettrovalvola pneumatica V16

- Vaso d'espansione olio
- Elettrovalvola pneumatica V17

### Turbosfera (caldaia materie prime)

La turbosfera assolve la funzione di un tino, dotato di apposita camicia entro cui scorre olio diatermico a temperatura di  $130 \div 150^{\circ}\text{C}$ . La capacità della turbosfera si aggira attorno ai 1800 kg. La funzione di questo sottosistema consiste nella fusione delle materie prime per la realizzazione del prodotto finito.

Il collante fluido cola per gravità, attraversando l'elettrovalvola V14 ed il prefiltro F53, fino alla pompa P51 (volumetrica ad ingranaggi), la quale lo invia al sistema tagliante previo filtraggio (filtro F50). Si noti che il prefiltro F53 serve come protezione per la pompa P51, mentre il filtro F50 deve filtrare il prodotto finito e ne influenza in modo diretto la qualità.<sup>27</sup>

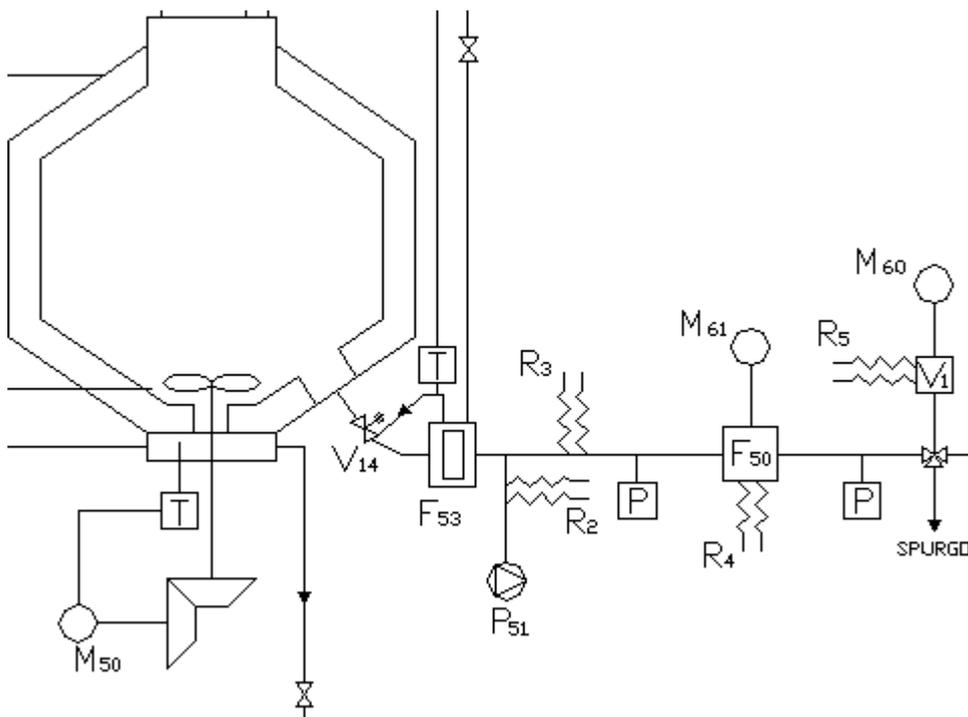


Figura 2.13: Turbosfera

Componenti del sistema:

<sup>27</sup>Notiamo fin da subito che secondo il processo RCM il prefiltro F53 sarà caratterizzato da guasti funzionali nascosti.

- Agitatore
- Motoriduttore M50 a ruote dentate coniche
- Variatore elettrico
- Pompa P51 (volumetrica ad ingranaggi)
- Condotta di scarico
- Filtro F50
- Prefiltro F53
- Elettrovalvola pneumatica V14 (dotata di camicia)
- Motore elettrico M60
- Valvola idraulica a tre vie PDV
- Resistenze R2
- Resistenze R3
- Resistenze R4
- Resistenze R5
- Motore elettrico M61

### Impianto di messa a vuoto della turbosfera

Questo sistema viene utilizzato per creare il vuoto all'interno della turbosfera (caldaia materie prime) allo scopo di togliere le bolle d'aria che rimangono imprigionate tra i collanti fusi, facilitandone, quindi, l'estrusione.

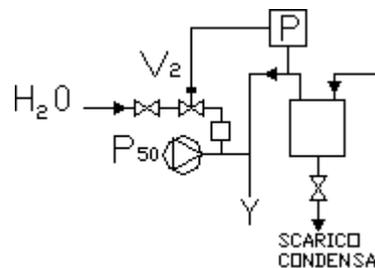


Figura 2.14: Impianto di messa a vuoto

Componenti del sistema:

- Pompa P50 ad anello di liquido
- Impianto idrico di alimentazione pompa P50
- Elettrovalvola V2

### Sistema tagliante

Il taglio avviene in acqua ed il prodotto finito viene trasformato in granuli, che verranno poi essiccati ed immagazzinati.

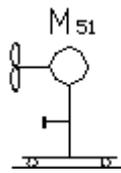


Figura 2.15: Sistema tagliante

Componenti del sistema:

- Motore M51
- Elica tagliante

### Impianto dell'acqua (circuito secondario)

L'acqua di raffreddamento del collante fuso scorre in un circuito chiuso, passando attraverso uno scambiatore di calore, dove viene opportunamente raffreddata alla temperatura ottimale di circa 20°C; durante la fase di estrusione trasporta il prodotto, in granuli, all'essiccatore. In uscita dall'essiccatore, l'acqua viene pompata verso un setaccio, che provvede ad eliminare le impurità residue; successivamente viene raccolta nella vasca che alimenta il ciclo.

Componenti del sistema:

- Acqua
- Scambiatore di calore
- Tubazioni
- Elettrovalvola pneumatica V10
- Elettrovalvola pneumatica V11

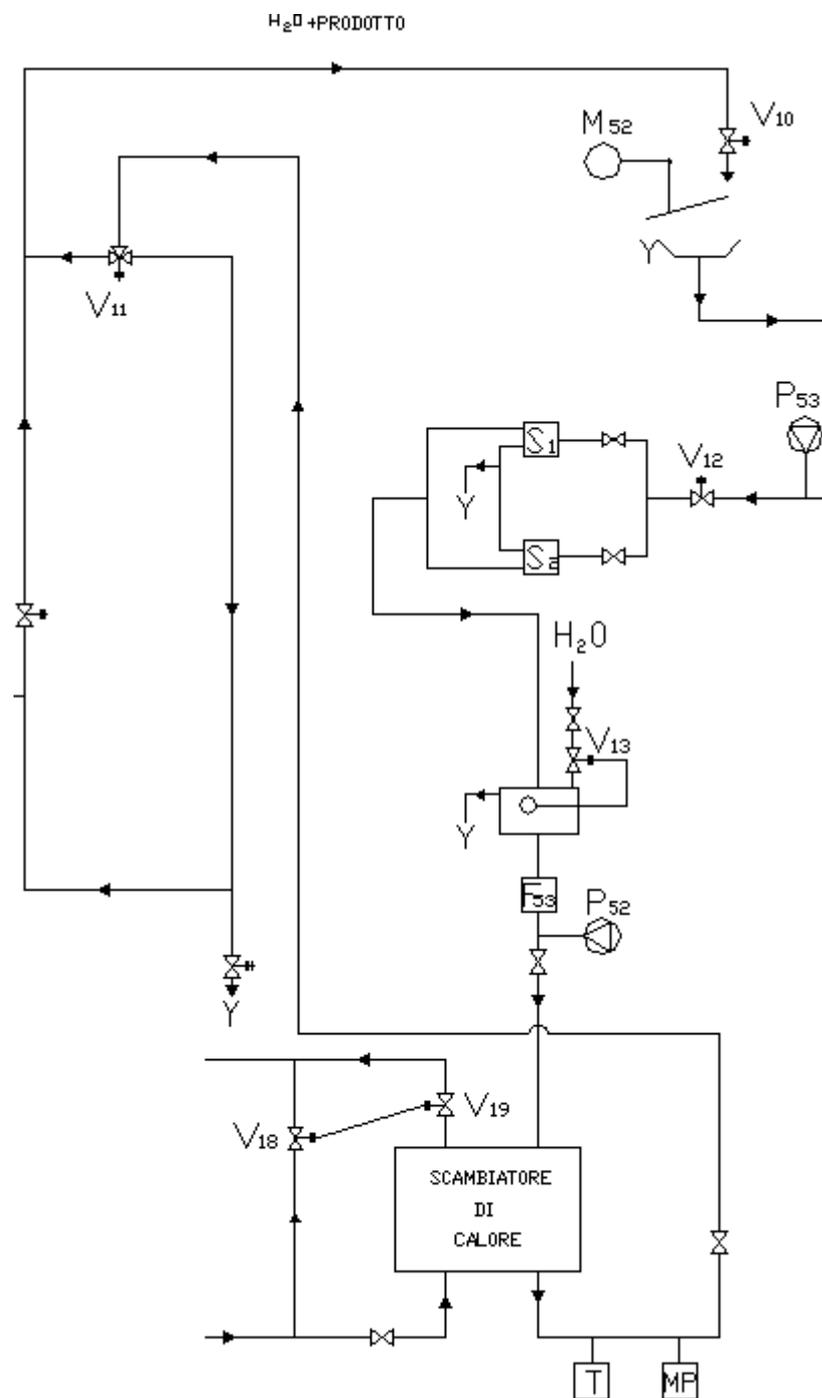


Figura 2.16: Impianto acqua di raffreddamento e veicolazione del collante solidificato a granelli

- Separatore agglomerati
- Setaccio S1/S2
- Pompa P53
- Elettrovalvola pneumatica V12
- Pompa P52

### Vasca di raccolta

Come abbiamo visto, l'acqua, dopo essere passata al setaccio, scende per gravità nella vasca di raccolta, da cui viene nuovamente pompata in circolo.

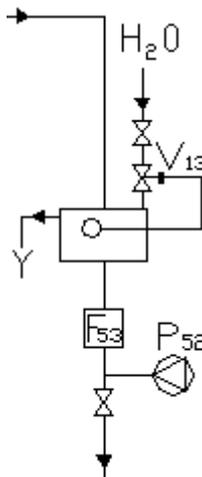


Figura 2.17: Sistema di raccolta dell'acqua

Componenti del sistema:

- Sonda di livello G1
- Elettrovalvola V13
- Filtro F53

### Impianto di essiccazione

Il collante, tagliato e solidificato in granuli, passando attraverso un separatore di agglomerati, giunge all'essiccatore centrifugo, dove viene asciugato da un flusso d'aria in controcorrente e successivamente insaccato.

Componenti del sistema:

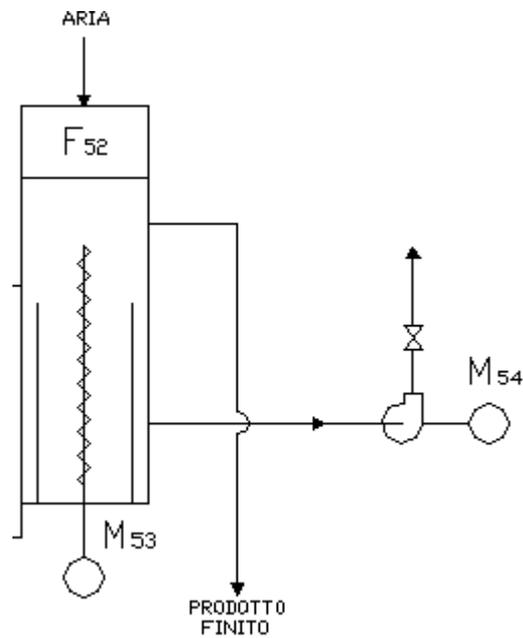


Figura 2.18: Impianto di essiccazione del collante

- Motore elettrico M53
- Essiccatore centrifugo
- Reti dell'essiccatore
- Filtro aria F52
- Motore elettrico M54
- Ventola d'aspirazione

### **Impianto di refrigerazione dell'acqua (circuito primario)**

La funzione di questo impianto consiste nel portare alla giusta temperatura di raffreddamento l'acqua del circuito primario.

Componenti del sistema:

- Pompa P54
- Elettrovalvola/valvola pneumatica V18
- Elettrovalvola/Valvola pneumatica V19
- Frigo

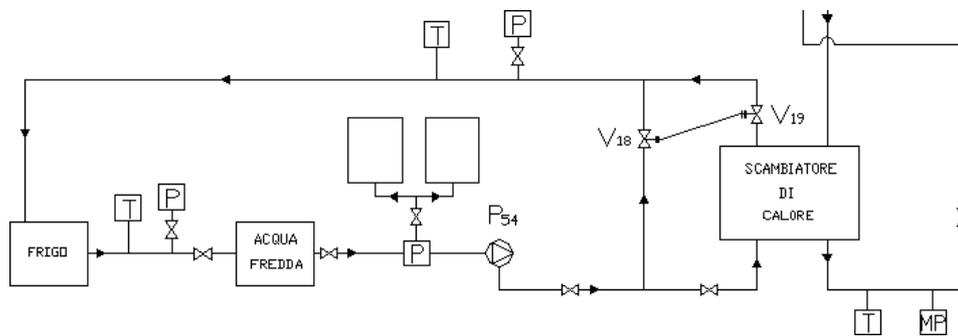


Figura 2.19: Impianto di refrigerazione dell'acqua nel circuito primario

### Impianto di aspirazione dei fumi e delle polveri

La cappa d'aspirazione dell'impianto è posta in prossimità della bocca di carico della turbosfera, al fine di aspirare i fumi e consentire agli operatori di poter lavorare in un ambiente salubre. L'evacuazione dei vapori di fusione dei collanti è fondamentale per la salvaguardia della salute degli operatori.

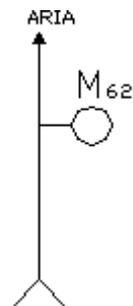


Figura 2.20: Sistema di aspirazione dei fumi e delle polveri

Componenti del sistema:

- Motore elettrico M62
- Ventola d'aspirazione

### 2.6.4 Risultati RCM

Il processo decisionale della *Reliability Centred Maintenance* è stato messo in pratica seguendo le indicazioni del diagramma decisionale. I risultati sono stati archiviati e classificati nelle tre diverse categorie di schede informative, schede di pianificazione e schede di manutenzione, e raggruppati per i 9

sottosistemi funzionali in cui è stata suddivisa la linea di produzione. Le schede di manutenzione, infine, sono state raccolte in forma di manuale di manutenzione dell'impianto.

Qui di seguito, a titolo di esempio, si riportano le sole schede relative al sistema **Turbosfera**.

**Schede informative — funzioni, guasti funzionali e cause**

<b>SOTTOSISTEMA (1): agitatore</b>					
<b>Funzioni</b>		<b>Guasti funzionali</b>		<b>Cause di guasto</b>	
<b>1</b>	Miscelare le materie prime durante la fase di riscaldamento in caldaia	<b>A</b>	Agitatore bloccato	<b>1</b>	Motore non funzionante
		<b>B</b>	Agitatore bloccato nonostante il motore sia funzionante	<b>1</b>	Rottura organo di collegamento tra motore elettrico e riduttore
				<b>2</b>	Rottura flangia di giunzione tra l'agitatore e l'albero del riduttore
		<b>C</b>	Agitatore rumoroso	<b>1</b>	Rottura elica agitatore
				<b>2</b>	Agitatore fatto ruotare senza carico

<b>SOTTOSISTEMA (2): motoriduttore M50 a ruote dentate coniche per rotazione agitatore</b>					
<b>Funzioni</b>		<b>Guasti funzionali</b>		<b>Cause di guasto</b>	
<b>1</b>	Porre in rotazione l'agitatore	<b>A</b>	Il motore non funziona	<b>1</b>	Motore difettoso
				<b>2</b>	Difetto nella rete
				<b>3</b>	Manca il collegamento elettrico al motore
				<b>4</b>	Guasto alla sonda che rileva la temperatura del premistoppa
				<b>5</b>	Manca il collegamento elettrico sonda/motore

<b>SOTTOSISTEMA (3): variatore elettrico</b>					
<b>Funzioni</b>		<b>Guasti funzionali</b>		<b>Cause di guasto</b>	
<b>1</b>	Variare il numero di giri del motore	<b>A</b>	Il numero di giri resta costante	<b>1</b>	Variatore difettoso
				<b>2</b>	Difetto nella rete
				<b>3</b>	Manca il collegamento elettrico al variatore

<b>SOTTOSISTEMA (4): pompa P51 (volumetrica ad ingranaggi)</b>					
<b>Funzioni</b>		<b>Guasti funzionali</b>		<b>Cause di guasto</b>	
<b>1</b>	Fare giungere all'elica tagliante il prodotto in uscita dalla turbosfera	<b>A</b>	Pompa non funziona (il prodotto non giunge all'elica tagliante)	<b>1</b>	Pompa difettosa
				<b>2</b>	Difetto nella rete
				<b>3</b>	Manca il collegamento elettrico alla pompa
				<b>4</b>	Pompa grippata causa mancata lubrificazione dei cuscinetti interni
		<b>B</b>	Aumenta l'assorbimento di corrente della pompa (salta la termica)	<b>5</b>	Grippaggio ingranaggi
				<b>1</b>	Il prodotto in uscita dalla turbosfera è molto denso e fatica ad arrivare alla pompa

<b>SOTTOSISTEMA (5): condotta di scarico</b>					
<b>Funzioni</b>		<b>Guasti funzionali</b>		<b>Cause di guasto</b>	
<b>1</b>	Consentire il passaggio del prodotto e mantenerlo allo stato fluido	<b>A</b>	Il prodotto non passa	<b>1</b>	Condotta di scarico ostruita

<b>SOTTOSISTEMA (6): filtro F50</b>					
<b>Funzioni</b>		<b>Guasti funzionali</b>		<b>Cause di guasto</b>	
<b>1</b>	Filtrare il prodotto in uscita dalla turbosfera	<b>A</b>	Il prodotto fatica a defluire (aumenta la differenza di pressione tra monte e valle del filtro)	<b>1</b>	Filtro intasato
		<b>B</b>	Il prodotto risulta inquinato	<b>1</b>	Filtro rotto
		<b>C</b>	Dispositivo idraulico, che permette la fuoriuscita del filtro per eventuale sostituzione, bloccato	<b>1</b>	Rottura condotta olio d'alimentazione del dispositivo idraulico
				<b>2</b>	Motore M61 non funzionante
				<b>3</b>	Manca l'olio nel serbatoio

<b>SOTTOSISTEMA (7): prefiltro F53</b>					
<b>Funzioni</b>		<b>Guasti funzionali</b>		<b>Cause di guasto</b>	
<b>1</b>	Filtrare il prodotto in uscita dalla turbosfera per proteggere la pompa P51 e mantenerlo ad una temperatura ottimale	<b>A</b>	Il prodotto fatica a defluire	<b>1</b>	Filtro intasato
				<b>2</b>	Elettrovalvola V17 chiusa (bloccata)

<b>SOTTOSISTEMA (8): elettrovalvola/valvola pneumatica V14 (dotata di camicia)</b>					
<b>Funzioni</b>		<b>Guasti funzionali</b>		<b>Cause di guasto</b>	
<b>1</b>	Consentire lo scarico del prodotto dalla turbosfera	<b>A</b>	Il prodotto non defluisce (valvola pneumatica chiusa)	<b>1</b>	Elettrovalvola difettosa
				<b>2</b>	Difetto nella rete
				<b>3</b>	Manca il collegamento elettrico all'elettrovalvola
				<b>4</b>	Guasto alla condotta dell'aria compressa che alimenta la valvola pneumatica
				<b>5</b>	Compressore difettoso
				<b>6</b>	Manca il collegamento elettrico al compressore
<b>2</b>	Mantenere il prodotto in uscita ad una temperatura ottimale	<b>A</b>	Il prodotto fatica a defluire (non arriva olio caldo alla valvola)	<b>1</b>	Elettrovalvola V17 chiusa (bloccata)

SOTTOSISTEMA (9): motore M60					
Funzioni		Guasti funzionali		Cause di guasto	
1	Azionare la valvola PDV a tre vie	A	Il motore non funziona	1 2 3	Motore difettoso Difetto nella rete Manca il collegamento elettrico al motore

SOTTOSISTEMA (10): valvola idraulica a tre vie PDV					
Funzioni		Guasti funzionali		Cause di guasto	
1	Consentire il passaggio o lo spurgo del prodotto finito	A	Valvola bloccata	1 2 3	Rottura condotta olio d'alimentazione della valvola idraulica Manca l'olio nel serbatoio Motore M60 non funzionante

SOTTOSISTEMA (11): resistenze R2					
Funzioni		Guasti funzionali		Cause di guasto	
1	Riscaldare il condotto di scarico in prossimità della pompa P51 al fine di mantenere il prodotto ad una temperatura ottimale	A	Il prodotto in uscita tende a raffreddarsi ostruendo il condotto	1 2 3	Resistenze difettose Difetto nella rete Manca il collegamento elettrico alle resistenze

SOTTOSISTEMA (12): resistenze R3					
Funzioni		Guasti funzionali		Cause di guasto	
1	Riscaldare il condotto di scarico tra la pompa P51 ed il filtro F50 al fine di mantenere il prodotto ad una temperatura ottimale	A	Il prodotto in uscita tende a raffreddarsi ostruendo il condotto	1 2 3	Resistenze difettose Difetto nella rete Manca il collegamento elettrico alle resistenze

SOTTOSISTEMA (13): resistenze R4					
Funzioni		Guasti funzionali		Cause di guasto	
<b>1</b>	Riscaldare il condotto di scarico in prossimità del filtro F50 al fine di mantenere il prodotto ad una temperatura ottimale	<b>A</b>	Il prodotto in uscita tende a raffreddarsi ostruendo il condotto	<b>1</b> <b>2</b> <b>3</b>	Resistenze difettose Difetto nella rete Manca il collegamento elettrico alle resistenze

SOTTOSISTEMA (14): resistenze R5					
Funzioni		Guasti funzionali		Cause di guasto	
<b>1</b>	Riscaldare il condotto di scarico in prossimità della valvola a tre vie PDV al fine di mantenere il prodotto ad una temperatura ottimale	<b>A</b>	Il prodotto in uscita tende a raffreddarsi ostruendo il condotto	<b>1</b> <b>2</b> <b>3</b>	Resistenze difettose Difetto nella rete Manca il collegamento elettrico alle resistenze

SOTTOSISTEMA (15): motore M61					
Funzioni		Guasti funzionali		Cause di guasto	
<b>1</b>	Azionare il dispositivo idraulico del filtro al fine di permettere la sostituzione del filtro stesso	<b>A</b>	Il motore non funziona	<b>1</b> <b>2</b> <b>3</b>	Motore difettoso Difetto nella rete Manca il collegamento elettrico al motore

## Schede decisionali — piano di manutenzione

SOTTOSISTEMA (1): agitatore													Sottosistema n°:	Auditor:	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	Y	N	N	Y	Y						Manutenzione programmata sotto condizione	1 anno	Meccanico	
1	B	1	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Meccanico	
1	B	2	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Meccanico	
1	C	1	Y	N	N	Y	N	N	N				Non richiede manutenzione programmata			
1	C	2	Y	N	N	N	N	N	N				Non richiede manutenzione programmata			

SOTTOSISTEMA (2): motoriduttore M50 a ruote dentate coniche per rotazione agitatore													Sottosistema n°:	Auditor:	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	Y	N	N	Y	N	N	N				La riprogettazione puo' essere desiderabile			
1	A	2	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			
1	A	3	Y	N	N	Y	N	N	N				Non richiede manutenzione programmata			
1	A	4	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Bettriciستا	
1	A	5	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Bettriciستا	

SOTTOSISTEMA (3): variatore elettrico													Sottosistema n°:	Auditor:	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	Y	N	N	Y	N	N	N				La riprogettazione puo' essere desiderabile			
1	A	2	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			
1	A	3	Y	N	N	Y	N	N	N				Non richiede manutenzione programmata			

SOTTOSISTEMA (4): pompa P51 (volumetrica ad ingranaggi)													Sottosistema n°:	Auditor:	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	Y	N	N	Y	N	N	N				La riprogettazione puo' essere desiderabile			
1	A	2	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			
1	A	3	Y	N	N	Y	N	N	N				Non richiede manutenzione programmata			
1	A	4	Y	N	N	Y	N	Y					Ripristino programmato	6 mesi	Meccanico	
1	A	5	Y	N	N	Y	N	Y					Ripristino programmato	6 mesi	Meccanico	
1	B	1	Y	N	N	Y	N	N	N				Non richiede manutenzione programmata			

SOTTOSISTEMA (5): condotta di scarico													Sottosistema n°:	Auditor:	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			

SOTTOSISTEMA (6): filtro F50													Sottosistema n°:	Auditor:	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	Y	N	N	Y	N	N	Y				Sostituzione programmata e ripristino	4 ore	Operatore	
1	B	1	N				N	N	Y				Sostituzione programmata	3/4 cicli di 4 ore	Operatore	
1	C	1	Y	N	N	Y	N	N	N				Non richiede manutenzione programmata			
1	C	2	N				Y						Manutenzione programmata sotto condizione	6 mesi	Meccanico	
1	C	3	Y	N	N	Y	N	Y					Ripristino programmato	1 mese	Operatore	

SOTTOSISTEMA (7): prefiltra F53													Sottosistema n°:	Auditor:	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	N				N	Y					Ripristino programmato	1 settimana	Operatore	
1	A	2	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Meccanico Betticista	

SOTTOSISTEMA (8): elettrovalvola/valvola pneumatica V14 (dotata di camicia)													Sottosistema n°: 8	Auditor: A. Veraldi	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	N				N	N	N	N	N		La riprogettazione puo' essere desiderabile			
1	A	2	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			
1	A	3	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Electricista	
1	A	4	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			
1	A	5	N				N	N	N	N	N		La riprogettazione puo' essere desiderabile			
1	A	6	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Electricista	
2	A	1	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Electricista	

SOTTOSISTEMA (9): motore M60													Sottosistema n°: 9	Auditor: A. Veraldi	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	N				N	N	N	N	N		La riprogettazione puo' essere desiderabile			
1	A	2	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			
1	A	3	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Electricista	

SOTTOSISTEMA (10): valvola idraulica a tre vie PDV													Sottosistema n°: 10	Auditor: A. Veraldi	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	Y	N	N	Y	N	N	N				Non richiede manutenzione programmata			
1	A	2	Y	N	N	Y	N	Y					Ripristino programmato	1 mese	Operatore	
1	A	3	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Mecanico	

SOTTOSISTEMA (11): resistenze R2													Sottosistema n°: 11	Auditor: A. Veraldi	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1 S1 O1 N1	H2 S2 O2 N2	H3 S3 O3 N3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	N1	N2	N3	H4	H5	S4				
1	A	1	N				N	N	N	N	N		La riprogettazione puo' essere desiderabile			
1	A	2	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			
1	A	3	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Electricista	

SOTTOSISTEMA (12): resistenze R3													Sottosistema n°:	Auditor:	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1	H2	H3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4				
1	A	1	N				N	N	N	N	N		La riprogettazione puo' essere dfesiderabile			
1	A	2	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			
1	A	3	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Bettricista	

SOTTOSISTEMA (13): resistenze R4													Sottosistema n°:	Auditor:	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1	H2	H3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4				
1	A	1	N				N	N	N	N	N		La riprogettazione puo' essere dfesiderabile			
1	A	2	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			
1	A	3	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Bettricista	

SOTTOSISTEMA (14): resistenze R5													Sottosistema n°:	Auditor:	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1	H2	H3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4				
1	A	1	N				N	N	N	N	N		La riprogettazione puo' essere dfesiderabile			
1	A	2	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			
1	A	3	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Bettricista	

SOTTOSISTEMA (15): motore M61													Sottosistema n°:	Auditor:	Data:	Foglio n°:
Informazioni di riferimento			Conseguenze di valutazione				H1	H2	H3	Azioni mancanti			Lavoro proposto	Intervallo:	Fatto da:	
F	GF	CG	H	S	E	O	S1	S2	S3	H4	H5	S4				
1	A	1	N				N	N	N	N	N		La riprogettazione puo' essere dfesiderabile			
1	A	2	N				N	N	N	N	N		Non richiede manutenzione programmata			
1	A	3	N				N	N	N	Y			Ispezione programmata	1 anno	Bettricista	

## Schede di manutenzione

<b>SOTTOSISTEMA (1):</b> Agitatore		
<b>INTERVALLO:</b>		<b>FATTO DA:</b>
1 anno		Meccanico
<b>STRUMENTI:</b> Vibrometro, analizzatore in frequenza		
1 A 1	Per verificare lo stato attuale del motore, effettuare un controllo elettronico utilizzando il metodo di analisi in frequenza della vibrazione	
1 B 1	Ruotare l'interruttore generale sulla posizione off, togliere i fusibili, togliere il collegamento elettrico al motore (staccare i cavi d'alimentazione), svitare la carcassa di protezione e verificare lo stato di usura dell'organo di collegamento. Se necessario sostituirlo	
1 B 2	Ruotare l'interruttore generale sulla posizione off, togliere i fusibili, togliere il collegamento elettrico al motore (staccare i cavi d'alimentazione), ispezionare visivamente lo stato attuale della flangia di giunzione tra l'agitatore e l'albero del riduttore. Se necessario sostituirla procedendo in questo modo: 1)svitare i bulloni sulla parte superiore della turbosfera (sul piano di servizio), 2)togliere la flangia di giunzione e sostituirla con una nuova, 3)ripristinare la parte superiore della turbosfera	

<b>SOTTOSISTEMA (2):</b> Motoriduttore M50 a ruote dentate coniche		
<b>INTERVALLO:</b>		<b>FATTO DA:</b>
1 anno		Elettricista
<b>STRUMENTI:</b> Tester elettrico		
Fermare il motoriduttore M50 e seguire le seguenti istruzioni:		
1 A 4	Ruotare l'interruttore del quadro di comando sulla posizione off, verificare i contatti elettrici della sonda, togliere l'ossidazione se necessario; sostituirla se necessario	
1 A 5	Ruotare l'interruttore del quadro di comando sulla posizione off, verificare la continuità del cavo elettrico, sostituirlo se necessario	

<b>SOTTOSISTEMA (4):</b> Pompa P51 (volumetrica ad ingranaggi)	
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
6 mesi	meccanico
<b>STRUMENTI:</b> Chiave dinamometrica o avvitatore pneumatico	
<p><b>1 A 4</b></p> <p><b>1 A 5</b></p>	<p>Ruotare l'interruttore del quadro di comando sulla posizione off e togliere il collegamento elettrico al motore (staccare i cavi di alimentazione). Utilizzare un cartello di avvertenza per evitare avviamenti involontari. Togliere le resistenze e la sonda. Vuotare la pompa ed eventualmente far circolare un solvente adeguato per eliminare tracce di prodotto che possono incollare i componenti. Togliere il giunto e la linguetta dall'albero di comando. Togliere il coperchio e la guarnizione della tenuta; smontare la tenuta. Smontare l'anello stazionario, il collarino e il coperchio con l'anello O-Ring. Estrarre i due cuscinetti dalla parte del coperchio insieme con l'albero di comando. Estrarre l'albero condotto. Svitare la flangia contenente l'anello O-Ring. Estrarre l'altra coppia di cuscinetti con linguetta. Controllare visivamente lo stato dei cuscinetti e degli ingranaggi; nel caso di usura lieve provvedere a lisciare con carta abrasiva fine (grana 600), mentre nei casi peggiori sostituirli. Controllare le superfici di scorrimento della tenuta e se necessario rilappare.</p> <p>Sostituire gli anelli di tenuta in elastomero, poichè in fase di smontaggio vengono danneggiati e non sono più in grado di garantire la tenuta. Fase di montaggio: inserire una coppia di cuscinetti con la relativa linguetta nel corpo della pompa. Montare il coperchio con il relativo OR; la freccia della targhetta deve indicare la direzione del flusso. Porre il corpo in verticale ed inserire la coppia di ingranaggi preventivamente lubrificati. Inserire la seconda coppia di cuscinetti con la relativa linguetta. Inserire l'anello di centraggio nella flangia, montare l'anello O-Ring. Chiudere la pompa, grafitare le viti, avvitare e serrarle con chiave dinamometrica o avvitatore pneumatico tarati. Controllare se è possibile ruotare a mano con facilità l'albero di comando. Se possibile, mettere dell'olio nella pompa. Montare la tenuta. Iniettare l'olio nella pompa e controllare di nuovo se gli ingranaggi possono essere ruotati a mano.</p>

<b>SOTTOSISTEMA (6):</b> Filtro F50	
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
4 ore	Operatore
<b>STRUMENTI:</b>	
<b>1 A 1</b>	Fermare la pompa P51. Azionare manualmente la leva e attendere la fuoriuscita del cilindro pneumatico, su cui si trova l'elemento filtrante. Utilizzare un paio di guanti onde evitare il contatto diretto col prodotto che potrebbe essere ad elevata temperatura. Con l'aiuto di un oggetto appuntito (cacciavite) estrarre il filtro intasato e sostituirlo con uno nuovo oppure con uno ripristinato. Azionare nuovamente la leva e attendere il rientro del cilindro pneumatico. Il filtro sostituito può essere ripristinato per 3 o 4 volte al massimo con l'uso della fiamma ossidrica
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
3/4 cicli di 4 ore	Operatore
<b>STRUMENTI:</b>	
<b>1 B 1</b>	Fermare la pompa P51. Azionare manualmente la leva e attendere la fuoriuscita del cilindro pneumatico, su cui si trova l'elemento filtrante. Utilizzare un paio di guanti onde evitare il contatto diretto col prodotto che potrebbe essere ad elevata temperatura. Con l'aiuto di un oggetto appuntito (cacciavite) estrarre il filtro intasato e sostituirlo con uno nuovo oppure con uno ripristinato. Azionare nuovamente la leva e attendere il rientro del cilindro pneumatico.
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
6 mesi	Meccanico
<b>STRUMENTI:</b> Vibrometro, analizzatore in frequenza	
<b>1 C 2</b>	Per verificare lo stato attuale del motore, effettuare un controllo elettronico utilizzando il metodo di analisi in frequenza della vibrazione
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 mese	Operatore
<b>STRUMENTI:</b>	
<b>1 C 3</b>	Controllare visivamente il livello dell'olio nel serbatoio, mediante l'indicatore di livello. Se necessario svitare il tappo di rabbocco ed aggiungere olio

<b>SOTTOSISTEMA (7):</b> Prefiltro F53	
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 settimana	Operatore
<b>STRUMENTI:</b>	
1 A 1	Con valvola V14 chiusa, togliere il coperchio di protezione, svitare manualmente le 4 viti ed estrarre il prefiltro. Per pulirlo utilizzare la fiamma ossidrica
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 anno	Meccanico/Elettricista
<b>STRUMENTI:</b> Tester elettrico	
1 A 2	Verificare visivamente se l'elettrovalvola V17 rimane bloccata. Se resta bloccata, ruotare l'interruttore del quadro di comando sulla posizione off. Verificare i contatti elettrici e la continuità dei cavi di alimentazione dell'elettrovalvola. Se necessario sostituirli. Se l'elettrovalvola non funziona, sostituirla

<b>SOTTOSISTEMA (8):</b> Elettrovalvola/valvola pneumatica V14 (dotata di camicia)	
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 anno	Elettricista
<b>STRUMENTI:</b> Tester elettrico	
1 A 3	Ruotare l'interruttore generale sulla posizione off, togliere i fusibili, verificare fusibili, portafusibili e cavi elettrici. Sostituirli se necessario
1 A 6	Ruotare l'interruttore generale sulla posizione off, togliere i fusibili, verificare fusibili, portafusibili e cavi elettrici. Sostituirli se necessario
2 A 1	Verificare visivamente se l'elettrovalvola V17 rimane bloccata. Se rimane bloccata, ruotare l'interruttore del quadro di comando sulla posizione off. Verificare i contatti elettrici e la continuità dei cavi elettrici di alimentazione. Se necessario sostituirli. Se l'elettrovalvola non funziona, sostituirla

<b>SOTTOSISTEMA (9):</b> Motore M60	
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 anno	Elettricista
<b>STRUMENTI:</b> Tester elettrico	
1 A 3	Ruotare l'interruttore generale sulla posizione off, togliere i fusibili, verificare fusibili, portafusibili e cavi elettrici. Sostituirli se necessario

<b>SOTTOSISTEMA (10):</b> Valvola idraulica a tre vie PDV	
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 mese	Operatore
<b>STRUMENTI:</b>	
1 A 2	Controllare visivamente il livello dell'olio nel serbatoio, mediante l'indicatore di livello. Se necessario svitare il tappo di rabbocco ed aggiungere olio
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 anno	Meccanico
<b>STRUMENTI:</b> Vibrometro, analizzatore in frequenza	
1 A 3	Per verificare lo stato attuale del motore, effettuare un controllo elettronico utilizzando il metodo di analisi in frequenza della vibrazione

<b>SOTTOSISTEMA (11):</b> Resistenze R2	
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 anno	Elettricista
<b>STRUMENTI:</b> Tester elettrico	
1 A 3	Ruotare l'interruttore generale sulla posizione off. Togliere i fusibili; verificare fusibili, portafusibili e cavi elettrici. Sostituirli se necessario

<b>SOTTOSISTEMA (12):</b> Resistenze R3	
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 anno	Elettricista
<b>STRUMENTI:</b> Tester elettrico	
1 A 3	Ruotare l'interruttore generale sulla posizione off. Togliere i fusibili; verificare fusibili, portafusibili e cavi elettrici. Sostituirli se necessario

<b>SOTTOSISTEMA (13):</b> Resistenze R4	
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 anno	Elettricista
<b>STRUMENTI:</b> Tester elettrico	
1 A 3	Ruotare l'interruttore generale sulla posizione off. Togliere i fusibili; verificare fusibili, portafusibili e cavi elettrici. Sostituirli se necessario

<b>SOTTOSISTEMA (14):</b> Resistenze R5	
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 anno	Elettricista
<b>STRUMENTI:</b> Tester elettrico	
1 A 3	Ruotare l'interruttore generale sulla posizione off. Togliere i fusibili; verificare fusibili, portafusibili e cavi elettrici. Sostituirli se necessario

<b>SOTTOSISTEMA (15):</b> Motore M61	
<b>INTERVALLO:</b>	<b>FATTO DA:</b>
1 anno	Elettricista
<b>STRUMENTI:</b> Tester elettrico	
1 A 3	Ruotare l'interruttore generale sulla posizione off. Togliere i fusibili; verificare fusibili, portafusibili e cavi elettrici. Sostituirli se necessario

## Capitolo 3

# Simulazione Monte Carlo applicata alla manutenzione

### 3.1 Natura della simulazione numerica

Uno dei compiti più stimolanti della realizzazione di macchine o di processi produttivi, consiste nella scelta e nella progettazione dei componenti, che assieme ad una adeguata programmazione della logica di funzionamento, garantiscono una ben determinata interazione di causa ed effetto con l'ambiente.

È tuttavia comune il problema di non sapere valutare a priori le reali prestazioni di esercizio, o l'effettivo comportamento del sistema in condizioni di funzionamento impreviste o anomale. Per risolvere il problema è pratica ormai consolidata effettuare degli esperimenti su un prototipo del sistema, preferibilmente in scala 1:1, ricostruendo le condizioni ambientali di interesse. I motivi per cui le campagne di prove sperimentali possono essere impraticabili o non efficaci sono però molteplici. Citiamo, in particolare, i seguenti:

- costi di realizzazione dei prototipi e di conduzione delle prove
- tempi non compatibili con le esigenze progettuali
- impegno di risorse nella progettazione degli esperimenti
- attrezzature spesso costose e non disponibili
- scarsa significatività statistica dei risultati
- prototipo ancora lontano dalla soluzione ottima e definitiva

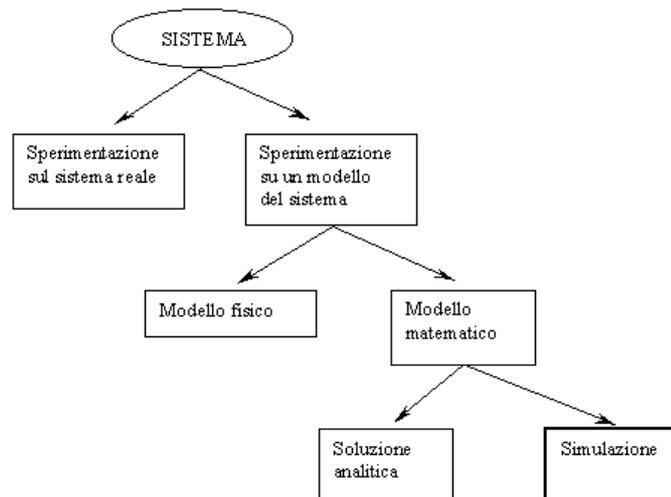


Figura 3.1: Sperimentazione sul sistema

In questi casi può essere conveniente formulare un modello matematico del sistema, istruire una serie di regole o vincoli comportamentali e di risposta agli stimoli ambientali, e simularne la dinamica.

Nei casi più semplici il problema può ammettere soluzione in forma chiusa, permettendo la risoluzione analitica con i consueti strumenti della matematica e fornendo risultati esatti dei parametri di interesse. L'approssimazione che si commette è intrinseca alla semplicità del modello stesso e alle ipotesi formulate. Nel caso di sistemi più complessi, tali per cui le ipotesi di modelli analitici siano troppo pesanti e quindi inaccettabili, occorre spingersi fino in fondo all'albero di figura 3.1, formulando modelli realistici e strutturando appositi programmi di simulazione numerica per la soluzione approssimata al calcolatore.

La simulazione numerica mette in luce particolari caratteristiche del sistema, di difficile se non impossibile valutazione, che permettono di indirizzare al meglio le strategie della direzione aziendale ed il processo di progettazione. In particolare la simulazione numerica si rivela di estrema utilità nella soluzione dei seguenti problemi:

- studio a priori degli effetti dei guasti su un sistema
- valutazione dell'efficacia di una politica manutentiva
- gestione delle risorse scarse, quali i pezzi di ricambio e la manodopera
- progetto ed analisi di linee di produzione
- valutazione dei requisiti hardware e software di sistemi informativi

- valutazioni di armamenti militari o di tattica militare
- progetto di sistemi di comunicazione e valutazione dei protocolli
- progetto di strutture per i trasporti, quali strade, aeroporti, metropolitane e porti navali
- valutazione di servizi ospedalieri, postali e di ristorazione
- analisi finanziarie e di sistemi economici
- ricerca di base e avanzata

Si noti che l'elemento unificatore della lista appena descritta è la natura fortemente aleatoria dei parametri che governano i singoli problemi.<sup>1</sup> In tutti questi casi la simulazione numerica può essere applicata con profitto!

### 3.2 Modelli per la simulazione numerica

Nell'ambito della simulazione numerica, possiamo definire il sistema come l'insieme di oggetti (per esempio macchine o persone) che interagiscono in un certo ambiente per il conseguimento di uno scopo prefissato, o nell'osservanza di un insieme di regole evolutive. All'atto pratico, ciò che si intende per sistema dipende dal particolare problema studiato; nel caso della manutenzione il sistema è un insieme di componenti elementari che interagiscono in un determinato contesto operativo, per svolgere una funzione prestabilita.

Come abbiamo già visto nel capitolo 1, si definisce *stato* del sistema l'insieme delle variabili necessarie a descriverne le caratteristiche di interesse durante l'evoluzione della missione. Nel caso della manutenzione meccanica, lo stato di un componente elementare può essere realisticamente descritto da una serie di parametri quali:

- funzionamento attivo, passivo, in ispezione o in riparazione
- età, o indice di degrado, o indice di prestazione
- istante di messa in servizio
- istante di inizio manutenzione o ispezione
- numero di riparazioni e di ispezioni subite
- tempi complessivi di funzionamento attivo e passivo

---

<sup>1</sup>Per esempio il rateo di guasto dei componenti, il fabbisogno di pezzi di ricambio, l'affluenza di passeggeri o di clienti, i valori azionari di borsa ...

- durata complessiva delle riparazioni e delle ispezioni

In particolare, ai fini della corretta formulazione del modello, i sistemi possono essere classificati in due categorie:

**sistemi per eventi discreti** in cui le variabili di stato cambiano in modo discontinuo e per intervalli discreti di tempo.<sup>2</sup>

**sistemi per eventi continui** in cui le variabili di stato cambiano continuamente nel tempo.<sup>3</sup>

Pochissimi sistemi sono nella realtà solo discreti o solo continui, anche se in genere, a seconda dei casi, uno dei due aspetti prevale sull'altro.

L'approccio numerico più opportuno ai problemi di simulazione è funzione delle seguenti tipologie di modelli:

**modelli statici contro modelli dinamici** un modello di simulazione statico viene implementato per i sistemi in cui il tempo non è una variabile di stato;<sup>4</sup> un modello di simulazione dinamico deve tenere conto dell'evoluzione nel tempo del sistema.<sup>5</sup>

**modelli deterministici contro modelli stocastici** un modello di simulazione si definisce deterministico se lo stato del sistema non contiene alcuna variabile aleatoria. Può essere il caso della soluzione di un'equazione differenziale analiticamente intrattabile, o dell'integrazione numerica.<sup>6</sup> Un modello stocastico deve elaborare anche variabili di stato aleatorie, producendo risultati affetti dall'errore statistico.

**modelli continui vs modelli discreti** la definizione è analoga a quella vista sopra per i sistemi continui e discreti, con la seguente osservazione: non è detto che per simulare un sistema discreto occorra formulare anche un modello discreto e viceversa.<sup>7</sup>

Per il caso particolare della manutenzione considereremo sistemi discreti per modelli di simulazione dinamici, stocastici e discreti. Ci aspettiamo, quindi,

---

<sup>2</sup>Per esempio il sistema 'coda di clienti' è definito dal numero di clienti in coda e dai tempi di arrivo e di partenza. La variabile di stato 'numero di clienti' cambia in modo discreto solo quando arriva un nuovo cliente, o quando un cliente viene servito.

<sup>3</sup>Per esempio la potenza erogata da un reattore nucleare.

<sup>4</sup>Per esempio l'estrazione di un particolare numero da una roulette truccata. Questi sistemi vengono tipicamente implementati con modelli Monte Carlo.

<sup>5</sup>Per esempio la simulazione di un *Loss Of Coolant Accident* in un reattore PWR.

<sup>6</sup>I risultati sono esatti, a meno degli errori numerici.

<sup>7</sup>Per esempio, un modello per la simulazione del traffico può essere discreto se è importante studiare il movimento delle singole vetture. Può altresì essere continuo, implementando le equazioni differenziali che ne regolano il flusso.

che il sistema non passi con continuità da uno stato di funzionamento ad uno stato di guasto, bensì che possa rompersi in corrispondenza di un insieme numerabile di istanti della missione (sistema discreto). Il modello è chiaramente dinamico perchè si vuole studiare l'evoluzione temporale del sistema soggetto ai guasti e alle manutenzioni; è stocastico per la natura stocastica del comportamento al guasto dei componenti e dei tempi di manutenzione; infine è discreto perchè in tal modo è possibile simulare le interazioni fra i singoli componenti considerando eventi non statisticamente indipendenti fra loro quali le ridondanze passive e le catene incidentali.

### 3.3 Avanzamento temporale della missione

Il modello di simulazione dinamico ad eventi discreti necessita di un metodo per gestire l'esecuzione degli eventi rispettando l'ordine cronologico. Storicamente esistono due modelli di controllo del tempo, e precisamente:

1. avanzamento a passo fisso
2. salto al prossimo evento

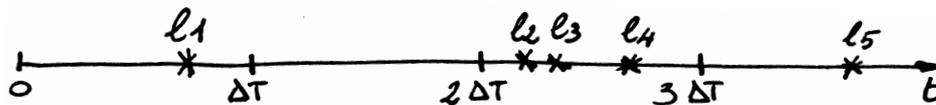


Figura 3.2: Avanzamento temporale a passo fisso

Il primo è il più semplice da implementare, avanza ad ogni iterazione di un passo  $\Delta T$  costante, come si mostra in figura 3.2, e richiede una procedura per il controllo e l'esecuzione di tutti gli eventi compresi in  $[T, T + \Delta T]$ .<sup>8</sup> Questa metodologia è estremamente deleteria per il caso della manutenzione, principalmente per due motivi. Innanzitutto il metodo non è in grado di riconoscere automaticamente gli ordini di grandezza delle costanti di tempo che regolano il sistema, condizione indispensabile per ottimizzare il valore del passo temporale  $\Delta T$ . In secondo luogo la possibilità che si verifichino due eventi, rispettivamente di guasto e di riparazione, all'interno dello stesso intervallo  $[T, T + \Delta T]$ , comporterebbe l'annullamento degli effetti dell'evento più debole, che in tal senso non verrebbe registrato.<sup>9</sup>

Per il caso della manutenzione, viene allora implementato il secondo metodo, che consiste, come si può osservare in figura 3.3, nella singola esecu-

<sup>8</sup> Possono essere uno, nessuno o centomila.

<sup>9</sup> In questo caso l'evento di guasto.



Figura 3.3: Avanzamento temporale mediante salto fra gli eventi

zione dell'evento più imminente.<sup>10</sup> Tale sistema comporta l'indubbio vantaggio di evitare inutili iterazioni in zone prive di eventi,<sup>11</sup> e la contabilizzazione degli effetti, per quanto di breve durata siano, di tutti gli eventi.

### 3.4 Simulazioni distribuite

Il flusso logico di una simulazione numerica è tipicamente sequenziale, ma è possibile sfruttare i moderni sistemi di calcolo parallelo,<sup>12</sup> distribuendo opportunamente il modello o le funzioni di simulazione indipendenti.

Nel primo caso, il calcolo parallelo aggredisce le dimensioni del modello, suddividendolo in  $n$  parti su cui vengono condotte simulazioni semi indipendenti. A intervalli saltuari, cioè, gli  $n$  sottomodelli si scambiano le opportune informazioni necessarie per tenere conto delle interazioni reciproche.

Il secondo metodo, che può essere applicato al caso della manutenzione, esegue la simulazione sull'intero modello, delegando le sole funzioni indipendenti, quali l'estrazione di numeri casuali o l'aggiornamento cronologico della lista degli eventi, alle altre unità di processo centrale. I risultati delle elaborazioni così differite vengono memorizzati in apposite strutture 'polmone', tipo le liste, in modo tale da essere disponibili alla bisogna.<sup>13</sup>

Esiste un'ulteriore metodologia di gestione del calcolo parallelo, che consiste sempre nel suddividere il modello in  $n$  parti, senza però prevedere delle interruzioni per le interazioni reciproche. Ogni singolo processore, quindi, impiega la totalità del proprio tempo nella simulazione, senza essere costretto ad aspettare i messaggi dai restanti  $n - 1$  sottomodelli.

Il controllo delle interazioni viene gestito lanciando un messaggio dal sottomodello  $i$  che ha generato l'evento di interazione, al sottomodello  $j$

<sup>10</sup>Uno ed un solo evento viene eseguito alla volta.

<sup>11</sup>Ricordiamo che lo stato del sistema può essere modificato solo a seguito dell'esecuzione di un evento.

<sup>12</sup>Costosi elaboratori dotati di più processori o reti di normali personal computer.

<sup>13</sup>Per esempio, perchè sprecare inutilmente tempo nell'esecuzione di algoritmi di generazione di numeri pseudo casuali, quando si può utilizzarne una lista già pronta?

interessato (o a più di un sottomodello, se del caso). Supponiamo che l'orologio di  $j$  indichi il tempo 54 e che  $j$  riceva un messaggio da  $i$  codificato al tempo attuale di  $i$ , antecedente rispetto a quello di  $j$ , diciamo al tempo 37. In tal caso  $j$  interrompe la propria simulazione, ripristina il proprio stato interno così come era al tempo 37 e riattiva la simulazione tenendo conto dell'informazione ricevuta da  $i$  ed evolvendo secondo un nuovo percorso.<sup>14</sup> Le risorse di calcolo vengono in tal modo sfruttate al massimo.

Esiste però una situazione particolarmente dannosa che nasce quando un dimensionamento poco felice dei singoli sottomodelli produce forti differenze nelle velocità di avanzamento dei cronometri di simulazione. Può accadere, infatti, che i sottomodelli più rapidi si trovino a cancellare continuamente gran parte delle proprie simulazioni, a causa dei messaggi che giungono con forti ritardi dal sottomodello più lento. Tale metodo risulta tanto più efficiente, quanto più sono disaccoppiati i singoli sottosistemi. Per questo motivo non è ragionevolmente applicabile al caso della simulazione di manutenzione, tipicamente caratterizzata da forti relazioni di reciproca dipendenza fra i componenti del sistema.

### 3.4.1 Simulazione di automi cellulari

Un modello ad automa cellulare consiste nella discretizzazione del sistema in celle che possono interagire solo con le 6 dirette confinanti (Nord, Est, Sud, Ovest, Su e Giù). Il modello è utile per studiare l'evoluzione di sistemi caratterizzati da interazioni fra i componenti a corto raggio, caratteristica che rende gli automi cellulari particolarmente adatti al calcolo parallelo.

Le applicazioni della simulazione ad automi sono tipiche nel campo della biologia e della fisica. Il famoso programma di simulazione *Life* ne rappresenta l'esempio classico.

In figura 3.4 si rappresenta una sezione XY di un automa 3D per lo studio del biorisanamento di suoli inquinati tramite pompaggio di  $H_2O_2$ . La liberazione di  $O_2$  alimenta i batteri naturalmente presenti nel suolo, che lo metabolizzano consumando il contaminante. In particolare si mostra la concentrazione di  $Fe^{++}$  disciolto nella fase acquosa, che si genera nel tempo ad opera delle reazioni di ossidazione del Fe presente nel terreno. Si noti che il flusso di  $H_2O_2$  è diretto dal basso verso l'alto della figura.

---

<sup>14</sup>Naturalmente  $j$  dovrà inviare anche i messaggi di contrordine degli eventuali messaggi spediti durante il lasso di tempo di simulazione da cancellare.

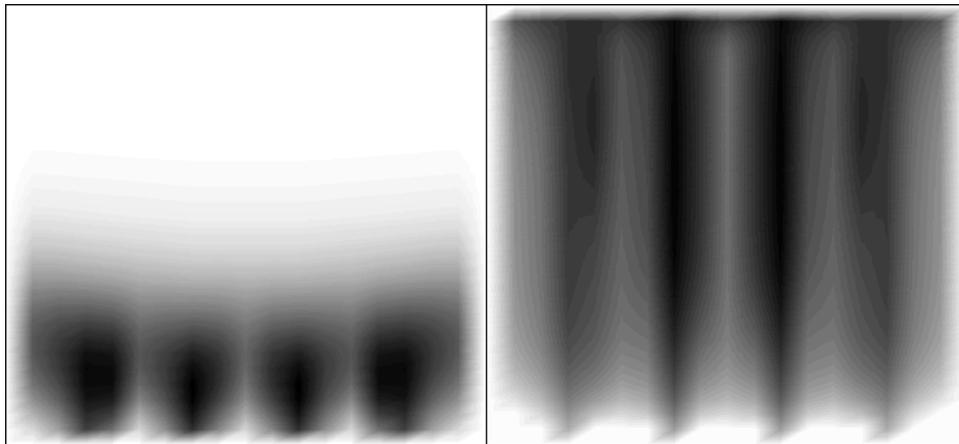


Figura 3.4: Simulazione di biorisanamento dei suoli — Concentrazione di  $\text{Fe}^{++}$  al giorno 1 e al giorno 60

### 3.5 Simulazione Monte Carlo

Possiamo definire il Monte Carlo, in modo restrittivo, come un processo di simulazione statico, per la risoluzione di modelli stocastici utilizzando estrazioni di numeri casuali uniformemente distribuiti nell'intervallo  $[0, 1[$ .

Il metodo può essere efficacemente utilizzato anche per la simulazione della manutenzione, che è un processo dinamico, ma la maggior parte delle applicazioni riguardano, in effetti, problemi di tipo statico quali stime di volumi, problemi di conteggio, percorsi casuali e stime di probabilità. In tal senso si mostra nella sezione 3.5.3 un'applicazione alla stima di probabilità di fuga (*leakage*) di neutroni monoenergetici da un mezzo isotropo diffondente a simmetria sferica.

#### 3.5.1 Cenni storici sul metodo Monte Carlo

Abbiamo visto che il metodo Monte Carlo fornisce soluzioni approssimate simulando numericamente degli esperimenti statistici quali, per esempio, il lancio dei dadi. Nonostante la metodologia sia fortemente statistica, il metodo può essere applicato a tutta una serie di problemi assolutamente deterministici, quali la soluzione di equazioni integro differenziali, fornendo risultati brillanti.

Questa caratteristica, da sola, non porterebbe a favorire il metodo Monte Carlo rispetto ad altri algoritmi numerici. Tuttavia la potenza statistica del metodo emerge nella velocità di convergenza. Fra tutti i metodi numerici che sfruttano  $n$  misure delle variabili di stato del sistema, prese nel

loro dominio  $m$  dimensionale, infatti, il Monte Carlo produce una soluzione approssimata con errore assoluto che decresce secondo una funzione di  $n^{-1/2}$ , quando in generale l'errore decresce al meglio secondo  $n^{-1/m}$ .

Questa proprietà conferisce al Monte Carlo considerevoli margini di vantaggio in efficienza computazionale, al crescere della dimensione  $m$  del problema. Il calcolo combinatorio ne è un tipico esempio, dal momento che la soluzione esatta richiede un costo computazionale esponenzialmente crescente con la numerosità  $m$  degli elementi.

Semplice dal punto di vista concettuale, il metodo Monte Carlo ha però conosciuto uno sviluppo decisamente articolato, attraverso tre grossi filoni di ricerca legati a periodi storici diversi. Il concetto di sequenza di numeri casuali viene proposto per la prima volta dai matematici del diciassettesimo e diciottesimo secolo, osservando i risultati aleatori di esperimenti successivi. Tuttavia è solo nel ventesimo secolo che gli statistici riconoscono la possibilità di utilizzare una sequenza di numeri casuali, previa le opportune elaborazioni, per derivare una soluzione approssimata al calcolo di integrali, problema questo che non contiene in sé alcuna natura stocastica.

Nel frattempo, si parla della fine del diciannovesimo secolo, lord Rayleigh sosteneva una linea di ricerca parallela, mostrando che l'evoluzione di percorsi casuali monodimensionali, senza barriere di assorbimento, poteva fornire soluzioni approssimate alla classe di equazioni differenziali paraboliche. Nel seguito dello sviluppo delle ricerche, si scoprì poi che particolari sistemi di equazioni alle differenze finite portavano alla soluzione approssimata di analoghi sistemi di equazioni differenziali alle derivate parziali, e che agli stessi sistemi ci si poteva ricondurre tramite percorsi casuali ricorsivi in domini bidimensionali opportunamente confinati. Si riconosceva, in particolare, che la soluzione di molti problemi di natura stocastica corrispondeva spesso allo studio di sistemi di equazioni differenziali. Si cominciò quindi a pensare di usare i metodi delle equazioni alle differenze finite per ricondursi alla soluzione approssimata di sistemi alle derivate parziali e dunque, ciò che costituiva l'obiettivo essenziale, alla risoluzione dei problemi stocastici originari.

La svolta più interessante, che ha portato il metodo Monte Carlo ad essere come oggi noi lo concepiamo, si raggiunge soltanto durante lo sviluppo dell'energia atomica, in particolare del progetto della bomba, verso il termine della seconda guerra mondiale e durante il periodo post bellico. Il problema di base della fisica nucleare del tempo consisteva nella risoluzione della diffusione o del trasporto dei neutroni attraverso un mezzo isotropo e moltiplicante, problema affascinante ma troppo complesso per essere affrontato analiticamente con i classici sistemi di equazioni integro differenziali. Il gruppo di ricerca di J. von Neumann e S. Ulam, intuì che le analogie provate con i processi stocastici potessero essere tali da permettere di sfruttare

una tecnica di percorsi casuali, opportunamente implementata sui primi calcolatori digitali del tempo, in modo da ottenere soluzioni sufficientemente approssimate al loro problema.

Questa idea rovesciò completamente il modo di avvicinare i problemi della matematica e della statistica, perchè invece di utilizzare complessi sistemi alle differenze finite per la soluzione dei problemi stocastici, si cominciò a formulare adeguati modelli di calcolo probabilistico per la soluzione di equazioni integro differenziali complesse, non necessariamente e non intrinsecamente di natura aleatoria.

Oggi la simulazione Monte Carlo viene correntemente ed ampiamente applicata nei vasti campi della scienza e della tecnica. In particolare è universalmente riconosciuto dai fisici, che il metodo Monte Carlo risulta l'approccio più efficiente ai problemi di neutronica particolarmente complessi.

### 3.5.2 Stima dell'errore

Il controllo dell'errore statistico insito nella metodologia di simulazione Monte Carlo viene controllato agendo sulla numerosità dei lanci e sulla velocità di convergenza del modello. Mentre la velocità di convergenza può essere migliorata introducendo opportune tecniche di riduzione della varianza, cosa che non è sempre possibile, la riduzione dell'errore aumentando la numerosità degli esperimenti è assicurata dalla legge dei grandi numeri e dal teorema del limite centrale (cfr. appendici A.2.6 e A.2.7).

In particolare, la legge dei grandi numeri porta a credere che, aumentando la numerosità di campionamento sperimentale all'infinito, l'errore che si commette approssimando  $\mu$  con  $S_n/n$  tende a zero. Di più, il teorema del limite centrale indica, in linea di principio, il modo per valutarne l'entità.

In realtà il metodo Monte Carlo si basa su tecniche di estrazione di numeri casuali e su modelli di simulazione che all'atto pratico contraddicono le ipotesi di entrambe queste leggi della statistica.

In primo luogo non è realisticamente possibile utilizzare una sequenza virtualmente infinita di numeri casuali. Anche gli algoritmi di generazione più sofisticati producono sequenze pseudo casuali, non casuali. La differenza consiste nel fatto che le sequenze pseudo casuali sono periodiche. Sono cioè costituite da una sequenza di numeri casuali finita, che si ripete nel tempo. La bontà di un generatore di numeri pseudo casuali, infatti, si giudica sulla capacità di generare periodi più o meno lunghi.

Questa osservazione, chiaramente, mette in luce il fatto che nella legge dei grandi numeri viene a cadere l'ipotesi della numerosità di campionamen-

to di eventi statisticamente indipendenti che tende all'infinito.<sup>15</sup> All'atto pratico, si può quindi scrivere:

$$\exists \epsilon_j > 0 : \lim_{n \rightarrow \infty} \Pr \left( \left| \frac{S_n}{n} - \mu \right| > \epsilon_j \right) = 1$$

e si può indicare il valore massimo dei possibili  $\epsilon_j$ ,  $\sup\{\epsilon_j\}$  come potere risolutivo del metodo.

Per quanto riguarda il teorema del limite centrale, poi, occorre osservare che sebbene il teorema fornisca una comoda approssimazione della banda di errore sulla stima puntuale dei valori attesi dei risultati di simulazione, la bontà dell'approssimazione stessa dipende dalla velocità con la quale la distribuzione della variabile  $(S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  converge alla distribuzione normale standard.

Nella maggior parte dei casi i modelli Monte Carlo ed i generatori di numeri pseudo casuali utilizzati, permettono di spingere i risultati numerici della simulazione ad un'accuratezza ampiamente maggiore rispetto a quella necessaria. Resta buona norma, comunque, essere consapevoli dei limiti di accuratezza del proprio calcolatore e degli algoritmi utilizzati.

### 3.5.3 Applicazione del Monte Carlo al calcolo della probabilità di fuga neutronica

Vediamo in questa sezione un'applicazione del metodo Monte Carlo al calcolo della probabilità di fuga di neutroni monoenergetici emessi da una sorgente puntiforme ed isotropa posta al centro di un mezzo diffondente, isotropo, omogeneo e a simmetria sferica.

Per quanto concerne le proprietà nucleari, faremo riferimento ad un neutrone di energia nota (in equilibrio termodinamico con il sistema) e a un materiale non fissile. Saranno quindi supposte note le sezioni d'urto microscopiche di assorbimento e di scattering relative all'energia del neutrone considerato. Lo scattering verrà inoltre supposto isotropo.

Consideriamo, per cominciare, la soluzione analitica del problema trascurando lo scattering, supponendo che nell'origine della sfera insista una sorgente monocromatica che emette  $Q$  neutroni al secondo.<sup>16</sup> Possiamo quindi calcolare la probabilità di assorbimento utilizzando le seguenti sezioni d'urto macroscopiche:

$$\Sigma_s = 0$$

---

<sup>15</sup>Proprio perchè esaurito il periodo di numeri casuali, l'estrazione dei successivi si ripete esattamente identica alla precedente.

<sup>16</sup>Osserviamo, per inciso, che la sorgente può essere sia isotropa che fortemente anisotropa, senza produrre alterazioni al calcolo della probabilità di fuga, vista la simmetria sferica del problema.

$$\Sigma_a = \sigma_a \frac{\rho N_A}{A}$$

Il numero di assorbimenti neutronici al secondo sarà l'integrale della *Reaction Rate* di assorbimento,  $\mathcal{R} = \Sigma_a \Phi$ , con  $\Phi = \Phi(r)$  flusso neutronico, esteso al volume della sfera:

$$\mathcal{C} = \int_0^{R_{sfera}} \Sigma_a \Phi(r) 4\pi r^2 dr \quad (3.1)$$

dove, tenendo conto del fattore di attenuazione geometrico  $1/(4\pi r^2)$  e del fattore di assorbimento  $e^{-\Sigma_a r}$ , si ha:

$$\Phi(r) = \frac{Q}{4\pi r^2} e^{-\Sigma_a r}$$

Sviluppando l'integrale 3.1 con la sostituzione  $y = \Sigma_a r$  si ottiene la seguente espressione per le catture neutroniche al secondo:

$$\mathcal{C} = Q \int_0^{\Sigma_a R_{sfera}} e^{-y} dy$$

e dividendo per la sorgente neutronica espressa in neutroni generati al secondo otteniamo, infine, l'espressione della probabilità di fuga, o *leakage neutronico*:

$$\mathcal{P} = \frac{\mathcal{C}}{Q} = 1 - e^{-\Sigma_a R_{sfera}}$$

Nel caso in cui sia, per esempio,  $R_{sfera} = 1cm$  e  $\Sigma_a = 1cm^{-1}$ , il leakage vale circa 0.6321, valore che ci permette di validare il codice numerico.

Consideriamo ora, il modello di simulazione Monte Carlo utilizzato per calcolare la probabilità di fuga neutronica, nel caso più generale in cui sia presente anche il fenomeno dello scattering. In questo caso, allora, la sezione d'urto macroscopica totale sarà la somma del contributo di scattering più quello di assorbimento:

$$\Sigma = \Sigma_s + \Sigma_a$$

Come prima cosa occorre simulare la nascita del neutrone per cui, supponendo la sorgente isotropa, avremo una funzione densità di probabilità di emissione angolare, in funzione degli angoli di colatitudine  $\vartheta$  ed azimuth  $\varphi$ , nella forma seguente:

$$\mathcal{S}(\vartheta, \varphi) = \frac{1}{4\pi}$$

ovviamente normalizzata ad 1 integrando sull'angolo solido  $4\pi$ . Siano  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  i coseni direttori del versore direzione di volo, e sia  $\xi$  un numero casuale,  $\xi \in \mathcal{U}|_{[0, 1[}$ , allora

$$\mathcal{E} = \begin{cases} \varphi = 2\pi\xi \\ \alpha = \cos(\varphi) \\ \beta = \sin(\varphi) \\ \gamma = 1 - 2\xi \end{cases}$$

rappresenta l'estrazione della generica direzione di volo di partenza.

Formuliamo, ora, un'espressione per la gittata del singolo volo e cioè per la distanza percorsa dal momento di emissione della particella fino alla prima interazione con il mezzo diffondente. Se consideriamo un fascio di neutroni collimati che interagiscono all'interno di un mezzo caratterizzato da una certa sezione d'urto macroscopica totale  $\Sigma$ , possiamo valutare la probabilità che un neutrone diffonda mantenendosi collimato per una certa distanza  $x$ , come il rapporto fra l'intensità del fascio collimato che si misura alla profondità  $x$  e l'intensità incidente iniziale. Essendo la variazione di intensità (ovviamente di segno negativo, trattandosi di attenuazione) proporzionale alla sezione d'urto macroscopica per la distanza percorsa  $-dI = \Sigma dx$ , si ricava la nota legge di attenuazione del fascio:

$$I(x) = I_0 e^{-\Sigma x}$$

dove  $I_0$  rappresenta l'intensità iniziale. La probabilità di penetrazione per una certa profondità  $x$  vale quindi:

$$\mathcal{P} = e^{-\Sigma x}$$

Possiamo quindi scrivere la seguente equazione per il calcolo della gittata di volo  $l$  del neutrone:

$$l = -\frac{1}{\Sigma} \ln(\xi)$$

con  $\xi \in \mathcal{U}_{[0,1]}$ . Nota la gittata  $l$  ed i coseni direttori di volo  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , è possibile calcolare le coordinate di atterraggio del neutrone. Se le coordinate appartengono al dominio sferico occorre valutare il tipo di interazione che il neutrone subisce, se di assorbimento o se di scattering, assumendo che la probabilità di un tale evento sia pari alla propria sezione d'urto macroscopica divisa per la sezione d'urto totale. Nel caso dell'assorbimento, per esempio:

$$\mathcal{P}_a = \frac{\Sigma_a}{\Sigma}$$

Se invece le coordinate di atterraggio non appartengono al dominio sferico, si incrementa di 1 il contatore dei neutroni sfuggiti. Il valore atteso del *leakage* si calcola come il numero di neutroni sfuggiti dal sistema, diviso per il numero totale di simulazioni di volo effettuate.<sup>17</sup> Si osservi in figura 3.5 la simulazione grafica delle traiettorie di volo di 10 neutroni. La visualizzazione è in prospettiva e sovrapposta alla sezione meridiana inferiore del dominio sferico considerato.

---

<sup>17</sup>Nell'ipotesi di assenza del riflettore.

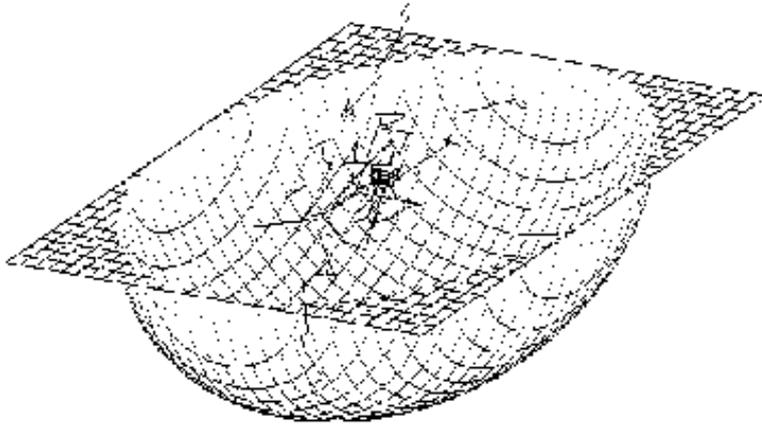


Figura 3.5: Simulazione del volo di 10 neutroni

### 3.5.4 Calcolo del leakage con tecnica di *splitting* neutronico

La simulazione Monte Carlo del volo del neutrone, che abbiamo descritto nella sezione 3.5.3 diventa di estremo interesse nei casi più realistici in cui il nocciolo è fortemente disomogeneo e di forme geometriche più complesse. Lo svantaggio di questa tecnica, tuttavia, è legato al tempo di calcolo necessario per stimare la probabilità di fuga con la precisione dovuta. In particolare, cosa che è sperabile, quando la probabilità di fuga è molto bassa, diventa necessario aumentare di molto il totale di storie simulate, in quanto il numero di neutroni che riescono a fuggire è troppo esiguo e la convergenza del metodo risulta lentissima.<sup>18</sup>

È allora possibile introdurre una tecnica di riduzione della varianza, al fine di aumentare la probabilità di registrare un evento di fuga, introducendo un'opportuna funzione di scattering anisotropo che tenda a favorire le direzioni radiali uscenti. È però evidente che la stima fornita andrà corretta tenendo conto della perturbazione introdotta nel sistema.

Un metodo più interessante, nel nostro caso, consiste nella tecnica di *splitting* neutronico. Se esaminiamo dal punto di vista fisico il modello, infatti, ci si accorge che quando un neutrone viene assorbito, anche se è riuscito a spingersi molto vicino alla frontiera del sistema di contenimento, non produce alcun contributo al calcolo della probabilità di fuga, rendendo quindi vano un evento rarissimo di simulazione.<sup>19</sup>

<sup>18</sup>Il metodo Monte Carlo senza l'introduzione di tecniche di riduzione della varianza è noto in letteratura come *Monte Carlo analogo*.

<sup>19</sup>Sarebbe come non voler riconoscere alcun valore militare al soldato che, dopo avere sbaragliato interi plotoni nemici, cade per mano dell'ultimo avversario superstito!

È possibile ovviare a questo inconveniente se pensiamo, per esempio, di suddividere il dominio in un insieme di gusci sferici concentrici ed implementiamo una procedura per fare *esplodere* i neutroni che forano un guscio in un certo numero  $n$  di frammenti. Possiamo associare a questi ultimi le stesse identiche proprietà fisiche del neutrone, ma con un peso percentuale che dipende dal numero dei frammenti stessi, e precisamente pari a  $1/n$ . In questo modo, quando un neutrone viene promosso al guscio più esterno può capitare che una certa frazione dei frammenti prodotti venga assorbita ed un'altra riesca a fuoriuscire dalla sfera, contribuendo, con il peso adeguato, al calcolo della probabilità di fuga.

Questo metodo si è dimostrato notevolmente efficace aumentando la velocità di convergenza del codice, a scapito però della maggiore complessità computazionale. In figura 3.6 si mostra il risultato grafico di una simulazione condotta generando un singolo neutrone, con tre suddivisioni in gusci della sfera e la suddivisione in due frammenti per ogni evento esplosivo.

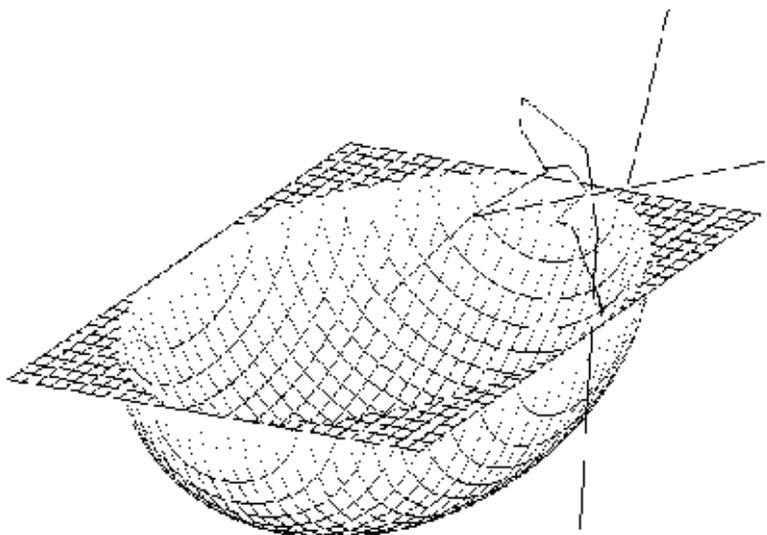


Figura 3.6: Simulazione del volo di 1 neutrone con splitting neutronico

Come ultima considerazione osserviamo che il metodo può essere ulteriormente ottimizzato. Si può infatti sfruttare il fatto che un neutrone, per sfuggire al dominio, deve necessariamente sopravvivere a tutti gli eventi di assorbimento, che possono verificarsi al momento di ogni singola collisione. Sia

$$\mathcal{P}_s = \frac{\Sigma_s}{\Sigma}$$

la probabilità di essere *scatterato* piuttosto che assorbito, allora ogni singola storia di volo può essere simulata dalla nascita fino alla fuoriuscita dal do-

minio, conteggiando il numero di collisioni  $n$  e considerando un contributo di fuga pari a  $(\mathcal{P}_s)^n$ . Il conteggio ottenuto andrà infine diviso per il numero  $m$  di storie simulate.

## Capitolo 4

# Il codice RAMSES

Abbiamo visto, nel capitolo 3, come la simulazione al calcolatore possa essere convenientemente utilizzata per studiare gli effetti della manutenzione su sistemi complessi. Lo scopo di questo capitolo consiste, quindi, nel presentare uno strumento di calcolo che sfrutta la simulazione numerica dei guasti e delle logiche di manutenzione per valutare a priori l'efficacia delle procedure manutentive, al fine di ottimizzare il piano di interventi programmati. In tal senso è stato sviluppato dall'autore il codice di simulazione RAMSES, il cui nome, volutamente mutuato da quello del faraone egizio vissuto nel IXX secolo a.c., rappresenta l'acronimo di *Reliability, Availability, Maintainability and Safety Engineering Software*.

Nel seguito vengono presentate la struttura e la logica di funzionamento del programma, con una nota di rilievo per la metodologia che implementa il concetto di età dei componenti e che permette di risolvere i problemi di calcolo affidabilistico relativi alla classe dei processi stocastici non rigenerativi.

### 4.1 Funzioni implementate

<i>Funzione</i>	<i>Note</i>
<b>Oggetto della simulazione</b> un singolo sistema riparabile un magazzino di pezzi di ricambio personale addetto alla manutenzione	non isolato possibilità di riordino pezzi

Tabella 4.1: Specifica del codice RAMSES

<i>Funzione</i>	<i>Note</i>
<b>Risultati della simulazione</b> disponibilità del sistema costo di esercizio andamento del livello dei ricambi disponibilità di manodopera diagramma del rischio	grafico + tabella grafico + tabella grafico + tabella grafico + tabella grafico + tabella
<b>Modello del sistema</b> struttura gerarchica ridondanze: gruppi <i>k su n</i> <i>stand-by</i> simmetrico <i>stand-by Master Slave</i> propagazione dei guasti	sottosistemi e componenti  possibilità di modellare le catene incidentali
<b>Guasto dei componenti</b> combinazione di carichi  distribuzioni di probabilità di guasto implementate  combinazioni di p.d.f. di guasto condizioni di <i>preguasto</i> combinazioni di più modi di guasto sui componenti calcolo del rischio	gestione delle storie di carico durante la missione  Esponenziale Weibull Normale Lognormale Gamma profili a <i>vasca da bagno</i> modelli di innesco del guasto in particolare per componenti passivi dovuto a danno istantaneo a causa del guasto dovuto a danno prolungato a seguito del guasto
<b>Guasto dei sottosistemi</b> calcolo del rischio	coefficienti di danno istantaneo o prolungato valutati a seguito dell'inefficienza del sottosistema nel suo complesso
<b>Politiche di manutenzione</b> manutenzione correttiva manutenzione proattiva	preventiva predittiva (attivata dalle condizioni di <i>preguasto</i> )

Tabella 4.2: Specifica del codice RAMSES — segue

<i>Funzione</i>	<i>Note</i>
<b>Sostituzione di un componente</b> tempo di organizzazione dell'intervento sostituzione in linea / fuori linea	possibilità di disattivare il sistema durante l'intervento
<b>Pianificazione e disassemblaggio</b> tempo di esecuzione richiesto personale necessario	qualifica e quantità
<b>Riparazione di un componente</b> tempo di riparazione richiesto personale necessario pezzi di ricambio da utilizzare costi per spese extra di manutenzione efficacia dell'intervento	qualifica e quantità voce di costo generica permette di conservare parte dell'età accumulata
<b>Prove prima della messa in servizio</b> tempo richiesto per le prove personale necessario costo delle prove	qualifica e quantità
<b>Sostituzione in blocco di sottosistemi</b> sostituzione correttiva sostituzione preventiva tempo richiesto personale necessario sostituzione in linea o fuori linea	qualifica e quantità possibilità di disattivare i sistemi di gerarchia superiore
<b>Rilevabilità dei guasti</b> immediata attraverso segnali di allarme  attraverso ispezioni periodiche	a seguito diretto del guasto gestione della logica di controllo del sistema  frequenza delle ispezioni voce di costo per le ispezioni personale necessario per le ispezioni

Tabella 4.3: Specifica del codice RAMSES — segue

<i>Funzione</i>	<i>Note</i>
<b>Gestione del magazzino</b> quantità iniziale livello di riordino  costo del pezzo di ricambio costi fissi di riordino tempi di consegna ritardo logistico di magazzino	soglia di attivazione della procedura di riordino  esempio i costi di trasporto ritardo che dipende dai fornitori ritardo che può essere controllato dall'azienda
<b>Personale di officina</b> numero di addetti alla manutenzione tempo di reperibilità costo orario della manodopera	suddivisi per qualifiche professionali

Tabella 4.4: Specifica del codice RAMSES — segue

## 4.2 Note sulla programmazione

Il codice RAMSES è scritto nel linguaggio di programmazione VBA (*Visual Basic for Applications*), con interfaccia di ingresso dei dati e di visualizzazione grafica dei risultati Microsoft Excel, e pertanto richiede il sistema operativo Microsoft Windows. Tale scelta è stata motivata dall'esigenza di implementare un prototipo funzionante in breve tempo e che permettesse la generazione di rapporti di calcolo chiari ed intuitivi, senza spreco di risorse di programmazione. Al momento, tuttavia, è in atto un progetto di traduzione delle procedure di simulazione numerica nel linguaggio *C++*, con l'intento di utilizzare le librerie grafiche *QT libraries* per la gestione di una interfaccia utente compatibile con entrambi i sistemi operativi Unix e Windows.

I valori numerici dei parametri di simulazione vengono memorizzati in virgola mobile a precisione singola (*32 bit*), con il limite di sette cifre significative. Al fine di ridurre il peso degli errori di macchina sui risultati, i calcoli vengono però svolti utilizzando variabili memorizzate in virgola mobile a precisione doppia (*64 bit*), consentendo quindi l'utilizzo di quindici cifre significative. Per non imporre particolari vincoli alle dimensioni del

problema da studiare, infine, i dati vengono memorizzati all'interno di matrici allocate in modo dinamico, permettendo il migliore utilizzo delle risorse hardware dell'elaboratore.

### 4.3 Struttura logica

Il programma si presenta come una normale cartella di lavoro di Microsoft Excel (*RAMSES.XLS*), formata da un foglio di presentazione (si veda la figura 4.1), dal menu a tendina *RAMSES* con i comandi principali per la gestione dell'interfaccia utente (figura 4.1) e dal progetto VBA che contiene le procedure di calcolo vere e proprie.

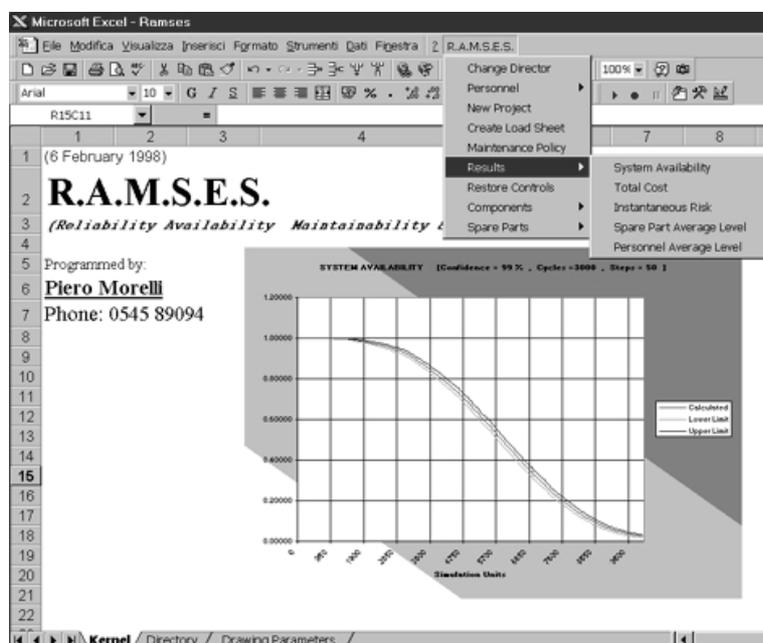


Figura 4.1: Codice RAMSES — schermata iniziale

Per lanciare una simulazione molto semplice occorre attivare una serie di comandi di base secondo la lista che segue:

- aprire il menu *RAMSES* e creare un'archivio di componenti<sup>1</sup> selezionando la sequenza di voci *Components*  $\leftrightarrow$  *Create New DB*
- aggiungere componenti all'archivio secondo necessità utilizzando la sequenza *RAMSES*  $\leftrightarrow$  *Components*  $\leftrightarrow$  *Add component to DB*

<sup>1</sup>Per la sua importanza faremo spesso riferimento, nel seguito, a questo archivio.

- creare una cartella per la gestione del progetto<sup>2</sup> selezionando la sequenza di menu *RAMSES*  $\leftrightarrow$  *New Project*
- impostare il tempo di missione, i cicli di simulazione e l'intervallo di osservazione
- costruire la struttura logica del sistema inserendo il diagramma a blocchi di affidabilità (*RBD*) nell'apposita matrice di sistema
- indicare le eventuali dipendenze logiche di tipo *stand by* o di propagazione di guasto
- creare e compilare il foglio di lavoro dei carichi che contiene le informazioni sui ratei di guasto dei componenti, attivando la voce di menu *RAMSES*  $\leftrightarrow$  *Create Load Sheet*
- impostare la politica di manutenzione secondo necessità attivando la voce di menu *RAMSES*  $\leftrightarrow$  *Maintenance Policy*
- premere il pulsante *Start Simulation*
- visualizzare i risultati relativi alla disponibilità del sistema, in funzione delle unità di simulazione, selezionando le voci di menu *RAMSES*  $\leftrightarrow$  *Results*  $\leftrightarrow$  *System Availability*

Vedremo nel dettaglio, che per lanciare simulazioni più particolareggiate è possibile utilizzare due cartelle aggiuntive: l'archivio dei pezzi di ricambio e l'archivio del personale di officina. Affinchè queste cartelle di Excel siano create con la corretta predisposizione delle maschere di inserimento dati, è opportuno che vengano attivate utilizzando i relativi comandi del menu *RAMSES*.

Le cartelle di archivio contengono le informazioni di base per i componenti e per il personale addetto alla manutenzione.<sup>3</sup> Questi dati vengono utilizzati dal codice di calcolo durante la simulazione, in funzione della logica di guasto e della politica di manutenzione inserite nella cartella del progetto.

Per visualizzare i risultati è sufficiente selezionare il comando *RAMSES*  $\leftrightarrow$  *Results* del menu e scegliere la rappresentazione grafica desiderata.<sup>4</sup>

---

<sup>2</sup>Faremo riferimento a questa cartella con il termine 'cartella del progetto'.

<sup>3</sup>Tempi di manutenzione, costi, tempi di reperibilità dei pezzi di ricambio o del personale in officina, costo della manodopera . . .

<sup>4</sup>Disponibilità, costo di esercizio, profilo di rischio, livello del magazzino ed utilizzo della manodopera.

## 4.4 Organizzazione degli archivi dei dati

### 4.4.1 Archivio dei componenti

Questo archivio contiene le informazioni di base legate alla tipologia dei componenti, organizzate in modo tale da avere un numero di fogli di lavoro pari al numero di componenti, ognuno dei quali viene poi contraddistinto dal proprio indice identificativo (si veda un esempio in figura 4.2). In particolare vengono specificati il numero dei modi di guasto e i dati di un intervento di manutenzione standard. È presumibile, infatti, che tali parametri siano per loro natura descrittivi di tutti i componenti che appartengono ad una stessa tipologia.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	<b>Component Number</b>	<b>2</b>	To operate Substitutions use Spare part n°					115	
2	Component Code		P 0001						
3	Description		POMPA DI ALIMENTAZIONE CARBURANTE						
4	Number of Up Failure Modes		1						
5	Number of Down Failure Modes		0						
6	Failure Up Mode n°	<b>1</b>							
7	Disassembly and Planning time			(1-5) 1		Fixed		SLOW MODE	
8	Parameters		Value: 0.05						
9	Diagnostic Personnel Requested		1		Professional Profile: 7		Quantity: 1		
10	Repair Time			(1-5) 4		Lognormal			
11	Parameters		$X_0$ : 0.5			$\mu$ : 1		$\sigma$ : 0.3	
12	Renewal percentage	(0-100): 75							
13	Repair extra expenses			(1-5) 1		Fixed			
14	Parameters		Value: 1500						
15	Personnel Requested for Repair		1		Professional Profile: 7		Quantity: 1		
16	Spare Parts Requested		1		Type: 3		Quantity: 1		
17	Time Requested for Tests			(1-5) 1		Fixed			
18	Parameters		Value: 0.1						
19	Personnel Requested for Tests		1		Professional Profile: 7		Quantity: 1		
20	Test costs	50							
21	Disassembly and Planning time			(1-5) 1		Fixed		FAST MODE	
22	Parameters		Value: 0.05						
23	Diagnostic Personnel Requested		1		Professional Profile: 7		Quantity: 1		
24	Repair Time			(1-5) 4		Lognormal			
25	Parameters		$X_0$ : 0.7			$\mu$ : 1		$\sigma$ : 0.4	
26	Renewal percentage	(0-100): 90							
27	Repair extra expenses			(1-5) 1		Fixed			
28	Parameters		Value: 10000						
29	Personnel Requested for Repair		1		Professional Profile: 7		Quantity: 1		
30	Spare Parts Requested		1		Type: 3		Quantity: 1		
31	Time Requested for Tests			(1-5) 1		Fixed			
32	Parameters		Value: 0.1						
33	Personnel Requested for Tests		1		Professional Profile: 7		Quantity: 1		
34	Test costs	50							

Figura 4.2: Archivio dei componenti

Gli andamenti di dettaglio dei ratei di guasto associati ad ogni modo di guasto, al contrario, non conviene che siano inseriti a questo livello di informazione. È infatti possibile che due componenti della stessa tipologia siano soggetti, all'interno dello stesso sistema e durante lo svolgimento della stessa missione, a cicli di lavoro di diversa durata e diversa intensità di carico. In altre parole, i profili di missione rappresentano un tipo di informazione non necessariamente legata alla natura del componente. Per questo motivo i parametri che individuano le distribuzioni di probabilità dei guasti dovranno essere inseriti nel foglio dei carichi della cartella del progetto.

I dati presenti nell'archivio dei componenti, quindi, non tengono conto della particolare funzione che il componente può avere all'interno del sistema. Per fare un esempio possiamo considerare l'impianto di pompaggio schematizzato in figura 4.3, costituito da due gruppi pompa funzionanti in parallelo e comandati da una serie di centraline e componenti elettronici. Consideriamo il caso in cui una soltanto delle due pompe venga installata nello stesso locale adibito alle centraline di controllo, costituendo quindi una situazione di rischio nell'eventualità che si verifichi un guasto con fuoriuscita di liquidi. Sotto questa ipotesi è chiaro che mentre alcuni parametri, quali i pezzi di ricambio ed i tempi tecnici di manutenzione, sono identici per entrambe le pompe, altri parametri quali le frequenze degli intervalli di ispezione ed i danni conseguenti ai guasti potrebbero essere sensibilmente diversi.

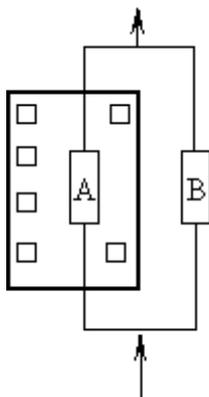


Figura 4.3: Schema di un impianto di pompaggio costituito da due pompe A e B in parallelo e da un insieme di centraline di controllo

Il sistema viene quindi modellato come un parallelo di due elementi indipendenti, costituiti fisicamente dallo stesso tipo di componente.

Riassumendo, le informazioni specifiche degli elementi, relative al loro ruolo, vengono inserite nella cartella del progetto. I soli dati dei componenti vengono invece introdotti nella cartella dei componenti, secondo il formato

di figura 4.2 di cui si fornisce una breve descrizione qui di seguito.

***To operate substitutions use spare part n°*** indice di riferimento<sup>5</sup> associato ad un pezzo in magazzino. Viene utilizzato quando la manutenzione sul componente non prevede la riparazione, bensì la completa sostituzione. Questo può essere il caso in cui, dopo avere accumulato una certa numerosità di interventi, si desidera effettuare la sostituzione con un componente nuovo.

***Component code*** campo di servizio,<sup>6</sup> utile per associare un codice mnemonico al componente per ovvie esigenze di chiarezza o di classificazione.

***Description*** campo di servizio per una migliore descrizione del componente.

***Number of up failure modes*** indica il numero di modi di guasto che possono verificarsi durante il normale funzionamento.

***Number of down failure modes*** indica il numero di modi di guasto che possono verificarsi durante i periodi di inattività del componente. Un classico esempio può essere il caso delle batterie inutilizzate, che si scaricano col tempo.

Per ogni singola modalità di guasto di entrambe le tipologie *attiva e passiva*, vengono automaticamente generate due schede identiche. La prima è relativa all'innesco del guasto<sup>7</sup> (*SLOW MODE*), mentre la seconda è relativa al guasto vero e proprio (*FAST MODE*). La suddivisione dei parametri in due schede è giustificata dal fatto che normalmente un intervento di manutenzione durante la condizione di preguasto risulta decisamente meno oneroso rispetto ai danni che un guasto è in grado di produrre. Si pensi, per esempio al caso estremo del rabbocco di olio lubrificante, contrapposto alla sostituzione di un motore fuso per l'eccessivo attrito fra i cilindri e le rispettive camice. I parametri che si possono impostare all'interno delle schede sono descritti qui di seguito.

***Disassembly and planning time*** seleziona il tipo di distribuzione di probabilità per il tempo necessario a smontare il componente e a pianificare l'intervento. Per i processi relativi ai tempi di manutenzione viene consigliato l'uso della funzione densità di probabilità Lognormale.

***Parameters*** lista dei parametri che caratterizzano la funzione di cui sopra.

---

<sup>5</sup>Corrisponde all'indice del foglio di lavoro, relativo al pezzo desiderato, nell'archivio dei pezzi di ricambio.

<sup>6</sup>I campi di servizio non vengono considerati dal codice durante la simulazione.

<sup>7</sup>Condizione di funzionamento degradata che prelude al guasto.

**Diagnostic Personnel Requested** numero di diverse qualifiche professionali<sup>8</sup> necessarie per effettuare il disassemblaggio e la diagnosi.

**Professional profile — Quantity** queste due celle vengono ripetute per il numero di righe specificato dal campo precedente; forniscono gli indici che fanno riferimento ai profili richiesti ed il numero di addetti necessari.

**Repair time** seleziona la p.d.f. per il tempo necessario alla riparazione.

**Parameters** lista dei parametri che caratterizzano tale funzione.

**Renewal percentage** specifica l'efficacia dell'intervento di manutenzione. Dal punto di vista della simulazione questo parametro agisce sull'età del componente secondo la semplice equazione seguente:

$$AGE = AGE \times \frac{100 - RENEW}{100}$$

Nel caso di una percentuale di rinnovo del 100% l'età viene azzerata (ottenendo, in tal modo, lo stesso effetto della sostituzione con un pezzo nuovo), mentre se il valore inserito vale 0, l'età non viene modificata. In quest'ultimo caso il componente viene ripristinato al corretto stato di funzionamento, conservando però l'età che aveva immediatamente prima del guasto.<sup>9</sup>

**Repair extra expenses** permette di considerare il costo di riparazione come variabile aleatoria. Come caso particolare può essere impostato un valore di costo fisso, che corrisponderebbe alla scelta di una funzione densità di probabilità 'δ di Dirac'.

**Personnel requested for repair** come abbiamo visto sopra per il caso del personale addetto al disassemblaggio e alla diagnosi, è possibile specificare le qualifiche professionali per la manodopera necessaria alla riparazione, indicando per ciascuna di essa il numero di addetti richiesti.<sup>10</sup>

**Spare parts requested** permette di indicare la lista dei pezzi di ricambio da utilizzare per la riparazione. In particolare occorre inserire l'indice identificativo del pezzo<sup>11</sup> e la quantità richiesta.

---

<sup>8</sup>Ogni qualifica professionale corrisponde a una scheda nell'archivio del personale, che contiene informazioni a riguardo dei costi orari, della reperibilità . . .

<sup>9</sup>Condizione *As Bad As Old*.

<sup>10</sup>Si noti, che secondo l'approccio proposto dalla *Reliability Centred Maintenance* (cfr. al cap. 2), questo tipo di informazione deve essere chiaramente specificato nelle schede di manutenzione unitamente agli strumenti necessari e alla procedura di intervento.

<sup>11</sup>Fa riferimento alla relativa scheda nell'archivio dei pezzi di ricambio.

**Time requested for tests** permette di inserire una variabile aleatoria per la simulazione del tempo necessario alla rimessa in servizio del componente e ad effettuare eventuali prove di buon funzionamento.

**Personnel requested for tests** come sopra, questa voce permette di introdurre nella simulazione anche il personale specializzato nelle procedure di controllo.

**Test cost** voce di costo fisso delle procedure di controllo.

#### 4.4.2 Archivio dei pezzi di ricambio — magazzino

La gestione del magazzino permette di simulare l'effetto dei ritardi logistici dovuti all'esaurimento delle scorte e ai tempi di consegna. In tal modo è possibile valutare il danno economico che ne consegue in termini di mancata produttività, ed il fattore di rischio a seguito dell'indebolimento della disponibilità del sistema. Le informazioni necessarie devono essere inserite nelle schede dell'archivio dei pezzi di ricambio, di cui si mostra un esempio in figura 4.4, unitamente alla descrizione di ogni singolo campo.

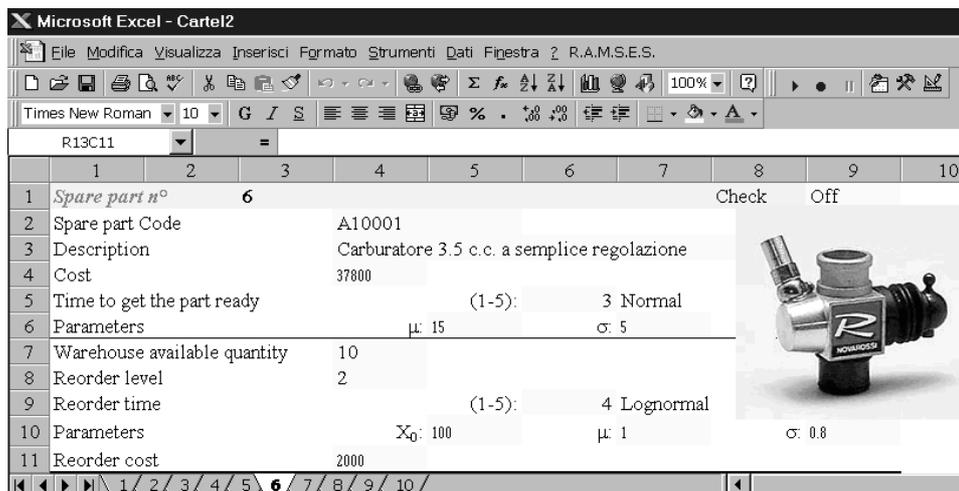


Figura 4.4: Formato delle schede nell'archivio dei pezzi di ricambio

**Check** può essere impostato a **On** oppure a **Off**. Se attivato, istruisce il codice affinché durante la simulazione provveda a mantenere traccia del livello delle scorte in funzione del tempo.<sup>12</sup> Questa funzione permette

<sup>12</sup>La fluttuazione del livello delle scorte, permette di effettuare un processo di ottimizzazione a posteriori, allocando le sole risorse di magazzino realmente necessarie ed abbattendo gli sprechi.

di mantenere compatte le dimensioni del file dei risultati, su cui verranno registrate le informazioni dei soli pezzi di ricambio che interessano. Per default l'opzione è disattivata.

**Spare part code** permette di indicare il codice che identifica univocamente il pezzo corrente.

**Description** campo di servizio per una migliore descrizione del pezzo.

**Cost** indica il costo del pezzo.

**Time to get the part ready** indica la distribuzione di probabilità che viene usata per estrarre il tempo impiegato a ricercare il pezzo e a portarlo in sito per la manutenzione.

**Warehouse available quantity** quantità di pezzi presenti in magazzino all'inizio della simulazione.

**Reorder level** soglia di attivazione della procedura di riordino<sup>13</sup> del pezzo.

**Reorder time** distribuzione di probabilità per l'estrazione del tempo necessario affinché i pezzi ordinati raggiungano il magazzino.

**Reorder cost** costo fisso dell'operazione di riordino.

### 4.4.3 Archivio del personale — officina

Dal punto di vista della logica di programmazione, la gestione del personale è identica alla gestione dei pezzi di ricambio, in quanto entrambe le entità devono essere trattate, per ovvie ragioni, come risorse indispensabili e scarse.<sup>14</sup> Si è preferito, tuttavia, separare le due tipologie di risorse manutentive per mantenere la massima chiarezza nel significato fisico dei parametri di simulazione.

Dai risultati dell'elaborazione potrebbe essere possibile individuare la presenza di periodi caratterizzati da un carico di lavoro più o meno intenso e procedere di conseguenza alla migliore pianificazione dei turni di servizio. Qui di seguito si fornisce una descrizione dettagliata dei parametri e si mostra in figura 4.5 la tipica interfaccia di una scheda del personale.

---

<sup>13</sup>L'entità del riordino è tale da ripristinare la quantità iniziale di pezzi. Il costo dell'operazione viene calcolato come il costo unitario del componente moltiplicato per la quantità ordinata, più un costo fisso legato al riordino stesso, che può tenere conto delle spese di trasporto o di altre voci di costo.

<sup>14</sup>L'obiettivo dell'ottimizzazione della manutenzione è anche quello di rendere minimo l'impiego di queste risorse, mantenendo nel contempo il sistema al di sopra delle soglie limite di disponibilità e di rischio.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Professional Profile n°			2				Check	On
2	Code			2					
3	Qualification			Saldatore di prima categoria					
4	Workshop available men			2					
5	In case of unavailability call from profile n°			3					
6	Call cost			10000					
7	Time to get ready to work				(1-5):	4	Lognormal		
8	Parameters			X <sub>0</sub> : 10		μ: 1		σ: 0.2	
9	Cost per unit of time			40000					

Figura 4.5: Formato delle schede nell'archivio del personale

**Check** può essere attivato su **On** oppure disattivato su **Off** (opzione di default). Se attivato, come abbiamo visto sopra nel caso dei pezzi di ricambio, il codice di calcolo provvede a memorizzare nel file dei risultati l'andamento del livello del personale (quantità di addetti) in stato di attesa in funzione del tempo.<sup>15</sup>

**Code — Qualification** parametri di servizio che identificano il tipo di profilo professionale corrente.

**Workshop available men** numero di addetti alla squadra di manutenzione.

**In case of unavailability call from profile n°** specifica il tipo di manodopera a cui si deve fare riferimento in caso di assenza di quella richiesta.<sup>16</sup>

**Call cost** costo fisso di chiamata, nel caso occorra fare ricorso ad un altro profilo professionale, per carenza di personale.<sup>17</sup>

**Time to get ready to work** indica la distribuzione di probabilità che viene utilizzata per determinare il tempo che il personale impiega a presentarsi sul luogo in cui effettuare l'intervento.

**Cost per unit of time** costo orario della manodopera.

<sup>15</sup>La logica implementata nel programma prevede che il personale di manutenzione sia di regola a riposo in officina e che venga impiegato nelle attività manutentive per il solo tempo necessario a preparare, condurre ed ultimare l'intervento. Si suppone, inoltre, che per l'intera durata della missione il personale sia opportunamente organizzato in turni tali da garantire una squadra di manutenzione sempre al completo.

<sup>16</sup>Al momento le procedure che trattano questa opzione non sono ancora state implementate.

<sup>17</sup>Anche questo campo, al momento, non viene considerato durante l'elaborazione.

## 4.5 Impostazione di un progetto

L'inserimento dei parametri di simulazione si effettua all'interno della cartella del progetto, che contiene le impostazioni della struttura del sistema, la fisica del guasto dei componenti e la logica di manutenzione. La cartella è organizzata in gruppi di cinque fogli di lavoro,<sup>18</sup> che gestiscono l'acquisizione dei parametri del sistema principale e degli eventuali sottosistemi annidati.

Esiste, inoltre, un foglio di lavoro a parte, che chiameremo il **main**, in cui sono specificati i parametri di gestione globale della simulazione, quali la durata della missione ed i riferimenti alle cartelle di archivio. Per una migliore comprensione delle singole funzioni dei fogli di lavoro, si fornisce qui di seguito una descrizione dettagliata.

### 4.5.1 Controllo della simulazione

Prendiamo in considerazione la figura 4.6, che mostra l'interfaccia automatica del **main** e affrontiamo i singoli parametri nell'ordine in cui compaiono.

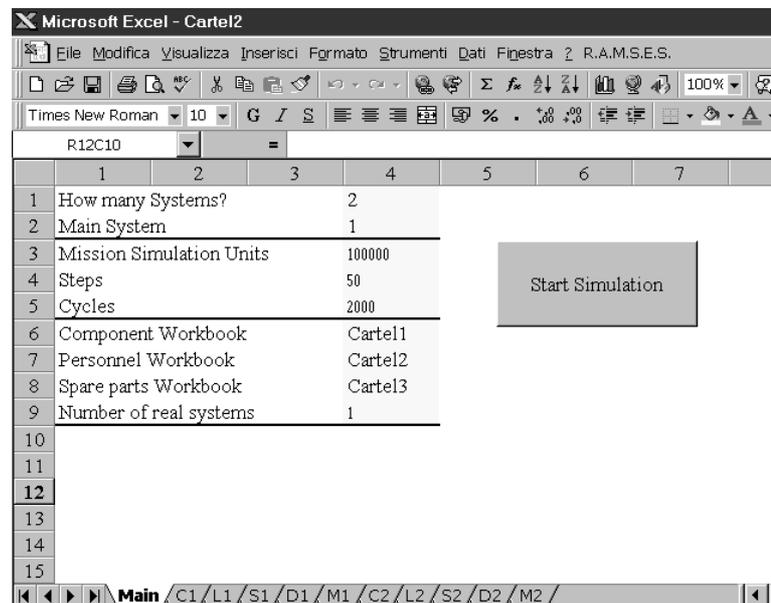


Figura 4.6: Interfaccia del main

**How many systems?** in questa cella deve essere inserito il numero totale

<sup>18</sup>Controllo, matrice di sistema, dipendenze, carichi e politica di manutenzione.

dei sottosistemi in cui è stata organizzata la logica funzionale del problema in esame, più uno (il sistema madre).<sup>19</sup>

**Main system** specifica l'indice di riferimento del sistema principale, dal momento che non è strettamente necessario che questo sia il primo.

**Mission simulation units** questo campo indica la durata della simulazione. L'unità di misura è volutamente assente,<sup>20</sup> in quanto oltre a misure di tempo non sono infrequenti misure di percorrenza chilometrica.<sup>21</sup> Per nostra comodità potremo fare riferimento al tempo per indicare l'unità di misura della scala su cui procede la simulazione.

**Steps** questa cella presenta una diretta influenza sulle dimensioni del file dei risultati e sulla granulosità dei grafici che si possono ottenere. Il valore inserito indica l'ampiezza degli intervalli temporali che vengono utilizzati per memorizzare i risultati. Consideriamo l'esempio mostrato in figura 4.7 relativamente all'affidabilità del sistema. Si vede chiaramente, che se l'am-

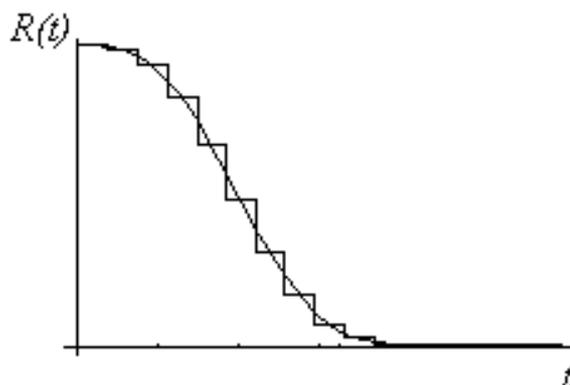


Figura 4.7: Effetto della risoluzione di calcolo utilizzata: per ottenere un profilo continuo occorre utilizzare un passo molto fine

piezza del passo temporale di memorizzazione è troppo elevata, si corre il rischio di abbassare la risoluzione dei risultati a livelli decisamente inaccettabili. Come regola generale, per la scelta ottima del valore numerico di questo parametro occorre raggiungere il giusto compromesso fra due esigen-

---

<sup>19</sup>Per fare un esempio, se il problema viene schematizzato con un sistema principale composto da vari elementi più due sottosistemi, uno dei quali, a sua volta, comprende altri tre sottosistemi, allora il numero totale da inserire è sette. Esistono, cioè, sette oggetti di tipo 'sistema', per i quali deve essere predisposto il set dei cinque fogli di lavoro descritti precedentemente.

<sup>20</sup>I risultati vengono proposti in forma grafica in funzione della variabile generica 'unità della simulazione'.

<sup>21</sup>Il codice di calcolo non prevede conversioni fra diverse unità di misura, per cui la consistenza numerica dei dati di ingresso è a cura dell'utente.

ze contrastanti. In primo luogo, infatti, conviene che il passo non sia troppo piccolo, pena l'eccessiva dimensione del file dei risultati e l'inutile appesantimento della complessità computazionale. In secondo luogo, tuttavia, occorre tenere presente che il passo temporale deve essere apprezzabilmente più piccolo della minima costante di tempo della simulazione, pena l'impossibilità di apprezzarne gli effetti sull'evoluzione del sistema.

**Cycles** indica il numero di cicli Monte Carlo (cfr. alla sez. 3.5) da effettuare e governa, quindi, la precisione numerica che si può ottenere dal processo di simulazione.

**Component workbook** in questa cella occorre indicare il nome della cartella che si desidera utilizzare come archivio per i componenti del sistema.

**Personnel workbook** come sopra, viene richiesto il nome dell'archivio relativo alla manodopera.<sup>22</sup>

**Spare parts workbook** anche questo campo serve per riconoscere una cartella di tipo archivio di dati. In questo caso si tratta dell'archivio dei pezzi di ricambio.<sup>23</sup> All'apertura della cartella del progetto, RAMSES provvede automaticamente al riconoscimento delle cartelle di archivio che fossero già caricate sotto Excel.

**Number of real systems** questo campo indica il numero totale di sistemi, tutti identici al modello costruito per la simulazione, che durante lo svolgimento della missione competono fra di loro attingendo risorse dallo stesso magazzino (cioè l'archivio dei pezzi di ricambio) e dalla stessa officina (cioè l'archivio della manodopera).<sup>24</sup> Un chiaro esempio può essere quello delle società di trasporti urbani, che gestiscono un certo numero di autobus tutti uguali ed utilizzano un unico grosso centro per la manutenzione dei propri mezzi.

---

<sup>22</sup>Questo punto, e più in generale la gestione del personale, possono essere tralasciati se ai fini della simulazione non interessa ottimizzare la risorsa umana.

<sup>23</sup>Questo punto può essere tralasciato nel caso si desideri effettuare una semplice simulazione di affidabilità.

<sup>24</sup>Attualmente la logica relativa a quest'ultima opzione non è ancora stata implementata. Il codice non prevede, quindi, l'utilizzo di questa cella, per cui la simulazione fornisce risultati relativi all'esistenza di un unico sistema.

### 4.5.2 Controllo di sistema

La funzione di questo foglio di lavoro, di cui si può vedere un esempio in figura 4.8, consiste nel dimensionamento automatico della matrice logica del sistema di indice  $j$ .<sup>25</sup> A tal fine è sufficiente inserire il numero di elementi ed il numero di nodi che caratterizzano la sua struttura funzionale secondo il RBD (cfr. al 1.3.4).

	1	2	3	4	5
1	System n°				1
2					
3					
4					
5	Elements			15	
6	Nodes			7	
7	Maintainable System?			Yes	
8					
9					

Figura 4.8: Esempio di un controllo di sistema

È previsto un ulteriore campo, impostato per default a **Yes** (condizione di manutenibilità), per la predisposizione automatica del foglio della politica di manutenzione attraverso la sequenza di menu  $RAMSES \leftrightarrow Maintenance Policy$ . Se tale campo viene impostato a **No**, la voce *Maintenance Policy* del menu viene disattivata ed il foglio di manutenzione non può essere generato.

### 4.5.3 Matrice di affidabilità di sistema

La matrice di affidabilità viene utilizzata per tradurre il diagramma a blocchi di affidabilità (RBD) del sistema in una forma numerica conveniente per l'elaborazione.

In figura 4.9 si mostra, a titolo di esempio, un diagramma RBD e l'equivalente rappresentazione matriciale. Si osservi che la numerazione delle righe corrisponde ai numeri dei nodi ai quali sono agganciati gli elementi, mentre questi ultimi sono associati alla numerazione delle colonne. Come si può vedere dalle figure, per gli elementi in parallelo è prevista la logica *k su n*; in questo caso particolare si nota un gruppo che funziona se due elementi su tre sono attivi. I tre componenti del gruppo devono essere inseriti uno di

<sup>25</sup>Sia esso il sistema principale o un sottosistema di qualsiasi livello.

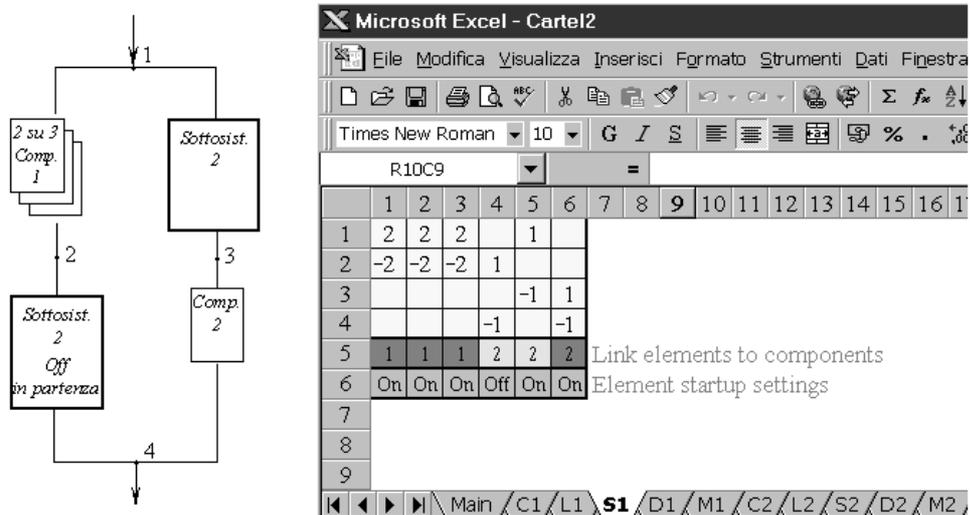


Figura 4.9: Rappresentazione della funzione di affidabilità tramite RBD e relativa matrice

seguito all'altro, digitando il numero  $k$  nelle caselle corrispondenti. Il caso più frequente di elementi singoli, si tratta riconducendosi alla logica *1 su 1*.

Nella penultima riga vengono memorizzati gli indici dei componenti reali che costituiscono fisicamente gli elementi logici. I sottosistemi si distinguono dagli elementi per il colore di sfondo delle celle, che deve essere rigorosamente diverso dal grigio.<sup>26</sup> L'ultima riga, infine, indica lo stato di funzionamento in cui si trovano gli elementi all'inizio della simulazione. Per fare un esempio, se abbiamo un parallelo di due motori elettrici che lavorano in stand by di tipo simmetrico, si può specificare al tempo zero quale dei due sia attivo e quale passivo.

#### 4.5.4 Gestione delle dipendenze — stand by e propagazione dei guasti

Questo modulo viene utilizzato per specificare le relazioni di ridondanza passiva<sup>27</sup> fra gli elementi e le modalità di guasto in grado di iniziare o propagare una catena incidentale. Osserviamo, al proposito, che le ridondanze passive possono essere agevolmente descritte da espressioni logiche del tipo:

L'elemento 1 sia da attivare se nessuno fra gli elementi 2, 3, 4

<sup>26</sup>Il grigio è il colore di default per gli elementi.

<sup>27</sup>Configurazioni, meglio note come stand by, in cui il componente ridondante resta passivo e viene attivato solo in seguito al guasto del principale.

e 5 risulta funzionante, oppure se nessuno fra gli elementi 3, 4, 6 e 7 risulta funzionante, oppure, ancora, se l'elemento 8 non è funzionante, altrimenti resti in stato di attesa.

Queste espressioni sono composte dall'unione di intersezioni di eventi relativi allo stato di funzionamento dei componenti. Per le proprietà dell'algebra di Boole, è possibile esprimere qualsiasi espressione logica in questo modo; le ridondanze, comunque complesse siano, non fanno eccezione. L'inserimento dei dati rispecchia questa strategia, essendo organizzato come un insieme di righe messe in relazione di **OR** logico tra loro, i cui elementi sono a loro volta in relazione di **AND** logico fra loro. In figura 4.10 si nota la configurazione relativa all'espressione che è stata utilizzata qui sopra come esempio.

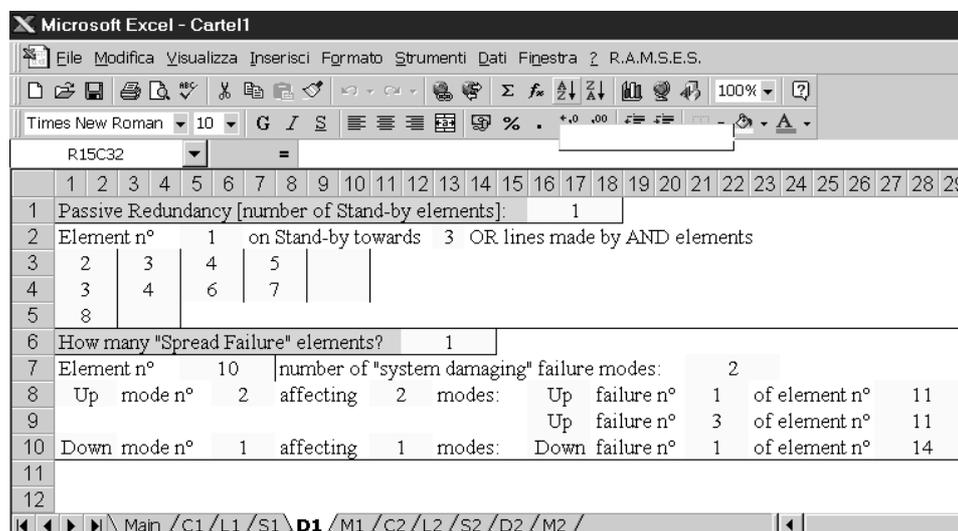


Figura 4.10: Interfaccia di controllo delle dipendenze — catene incidentali e ridondanze passive

Per quanto riguarda la propagazione incidentale si continui a fare riferimento alla figura 4.10. In particolare si noti che deve essere specificato il numero di elementi pericolosi. Per ognuno di questi ultimi, poi, occorre inserire l'indice identificativo ed il numero dei modi di guasto potenzialmente critici. Questi, a loro volta, vengono indentificati univocamente dalla tipologia di appartenenza (**Up** e **Down**)<sup>28</sup> e dal numero d'ordine. In ultimo si compila la lista degli anelli deboli della catena incidentale, puntualizzando i modi di guasto che ne vengono influenzati.

<sup>28</sup>Un modo di guasto di tipo Up causa la rottura durante lo stato di normale funzionamento del componente, mentre il tipo Down agisce durante i periodi di inattività.

#### 4.5.5 Condizioni di carico e ratei di guasto dei componenti

Occorre osservare che le condizioni di carico a cui sono soggetti i componenti possono cambiare considerevolmente durante il corso della missione, a causa di variazioni del tipo di carico applicato e della sua intensità. È chiaro l'esempio delle sospensioni automobilistiche, tipicamente soggette a carichi variabili dovuti sia alle asperità stradali che ai cicli di viaggio e di sosta delle vetture. Osserviamo, ancora, che l'esperienza ci suggerisce un profilo a *vasca da bagno* per le curve di rischio relative ai sistemi meccanici, del tipo visualizzato in figura 4.11, dove si mostrano gli andamenti delle funzioni hazard di un componente per valori crescenti dell'intensità di carico.

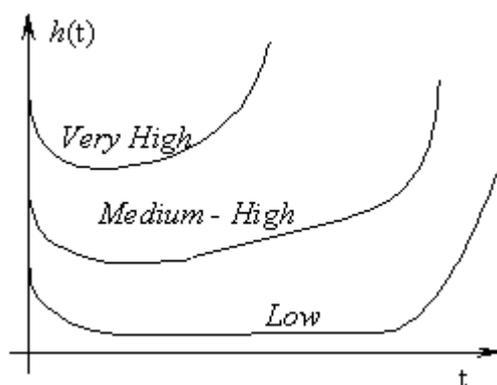


Figura 4.11: Diagrammi del rateo di guasto per intensità del carico crescente

Alla luce della prima osservazione, al fine di garantire una raffinata descrizione dei *failure rate*, risulta necessario, per ogni modalità di guasto specificata nell'archivio dei componenti, prevedere le seguenti opzioni:

1. Possibilità di cambiare condizione di carico durante il corso della simulazione.
2. Condizioni di carico di tipo *continuativo*, caratterizzate da un unico tipo di carico.
3. Condizioni di carico di tipo *periodico*, caratterizzate da un numero a piacere di cicli di carico fra loro diversi, di durata prestabilita, che si susseguono fino al termine della condizione stessa.

Per quanto riguarda la seconda osservazione, poi, si è deciso di adottare una composizione di funzioni secondo quanto esposto qui di seguito. Le singole condizioni di tipo *continuativo*, oppure i singoli cicli di carico appartenenti ad una condizione *periodica*, vengono associati ad un numero di intervalli

temporali, inserito in ingresso dall'utente, che saranno chiamati periodi di carico, o più semplicemente, periodi. Per ogni singolo periodo, infine, viene scelta una funzione densità di probabilità di guasto fra quelle disponibili.<sup>29</sup>

Questa esigenza viene motivata dalla necessità di fornire un modello soddisfacente per tutte le diverse situazioni fisiche corrispondenti alle fasi di vita del componente, che comprendono, in generale, la fase dei guasti infantili, la fase della maturità, o vita utile, e la fase della vecchiaia o dei guasti da usura. Utilizzando un'unica funzione, infatti, non è possibile costruire un modello che presenti margini di errore accettabili per ogni valore dell'età del pezzo in esame. Nel caso della curva a vasca da bagno, per esempio, si può utilizzare una distribuzione esponenziale per la vita utile, che prevede un rateo di guasto costante, mentre per le code a tasso di guasto crescente o decrescente, possono essere efficacemente utilizzate due distribuzioni di Weibull<sup>30</sup> (con parametro di forma  $\beta$ , rispettivamente, maggiore e minore di uno).

Convieni ora procedere all'analisi dettagliata dei campi disponibili, sulla base della figura 4.12, che mostra un esempio particolare dell'interfaccia utente per l'inserimento dei carichi.<sup>31</sup> I dati possono essere inseriti per tutte le modalità di guasto degli elementi che compongono il sistema a cui è collegato il foglio di lavoro. Consideriamo, a titolo di esempio, il primo modo di guasto del primo elemento.

**Number of load conditions** viene specificato il numero di condizioni di carico che si desidera utilizzare durante il corso della simulazione.

**Load condition n° 1 Type (1-2)** questa cella indica il tipo della condizione di carico corrente. In particolare è possibile utilizzare condizioni continue oppure periodiche. Vediamo, per il momento, il caso semplice relativo a quelle continue:

**Simulation units** il campo **From** viene impostato automaticamente a **0** oppure al termine della condizione di carico precedente. Il campo **To** viene specificato dall'utente, che controlla, di conseguenza, la durata della condizione stessa.

**Description period number** numero dei periodi di carico che servono per modellare la distribuzione di probabilità di guasto da utilizzare per la condizione di tipo continuo.

**Period 1** il campo **From**, ancora una volta, viene gestito automaticamente essendo i periodi contigui, mentre il campo **To** viene specificato dall'utente.

---

<sup>29</sup>Si rimanda per i dettagli di calcolo alla sezione 4.7.4.

<sup>30</sup>cfr. appendice A.3, per una adeguata descrizione delle funzioni densità di probabilità di guasto.

<sup>31</sup>L'interfaccia è programmata in modo da riconfigurarsi in automatico in funzione dei parametri progressivamente inseriti dall'utente.

R.A.M.S.E.S.									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Element n° 1								
2	Failure Up Mode n° 1								
3	Number of Load Conditions		2						
4	Load Condition n°	1	Type(1-2): 1		Continuous				
5	Simulation Units	From: 0		To: 57600					
6	Description period number: 2								
7	Period	1	From: 0		To: 40000				
8	Failure onset p.d.f.			Type(1-5): 1	Exponential				
9	Parameters	Failure Free Life: 10000			MTBF: 25000				
10	Time to failure p.d.f.	Type (1-5): 3		Normal					
11	Parameters	$\mu$ : 100			$\sigma$ : 20				
12	Period	2	From: 40000		To: Infinity				
13	Failure onset p.d.f.			Type(1-5): 2	Weibull				
14	Parameters	Failure Free Life: 30000			$\beta$ : 3	$\theta$ : 19000			
15	Time to failure p.d.f.	Type (1-5): 3		Normal					
16	Parameters	$\mu$ : 100			$\sigma$ : 20				
17	Load Condition n°	2		Type(1-2): 2		Periodic			
18	Simulation Units	From: 57600		To: Last Unit					
19	Number of different Load Cycles: 2								
20	Load Cycle n°	1		Cycle duration units: 1000					
21	Description period number: 1								
22	Period	1	From: 0		To: Infinity				
23	Failure onset p.d.f.			Type(1-5): 3	Normal				
24	Parameters	$\mu$ : 70000			$\sigma$ : 15000				
25	Time to failure p.d.f.	Type (1-5): 1		Fixed					
26	Parameters	Value: 0							
27	Load Cycle n°	2		Cycle duration units: 700					
28	Description period number: 1								
29	Period	1	From: 0		To: Infinity				
30	Failure onset p.d.f.			Type(1-5): 4	Lognormal				
31	Parameters	Failure Free Life: 35000			$\mu$ : 1	$\sigma$ : 0.7			
32	Time to failure p.d.f.	Type (1-5): 1		Fixed					
33	Parameters	Value: 0							

Figura 4.12: Interfaccia di predisposizione delle condizioni di carico e dei ratei di guasto dei componenti

**Failure onset p.d.f.** questa cella indica il tipo di funzione densità di probabilità di innesco del guasto, che si desidera associare al periodo corrente.<sup>32</sup>

**Parameters** parametri della funzione richiesta.

**Time to failure p.d.f.** tipo di distribuzione di probabilità da utilizzare per estrarre il tempo che intercorre tra l'innesco del guasto e la rottura effettiva.<sup>33</sup>

Vediamo ora le condizioni di tipo periodico:

<sup>32</sup>L'estrazione di un tempo da questa distribuzione ha il significato fisico di condizione di preguasto.

<sup>33</sup>Intervallo  $\mathcal{P} \mapsto \mathcal{F}$  fra il guasto potenziale ed il guasto.

**Simulation units** come sopra, viene richiesta la durata della condizione di carico.

**Number of different load cycles** questa cella indica il numero di cicli di carico che si susseguono durante la condizione stessa.

**Load cycle n° 1 Cycle duration units** questo è il campo che specifica la durata del ciclo corrente.

**Description period number** viene specificato il numero di periodi di carico che si desidera utilizzare per modellare la distribuzione associata al ciclo corrente.

... segue come nel caso di condizione di carico di tipo continuo.

#### 4.5.6 Impostazione della politica di manutenzione

Le informazioni relative al piano di manutenzione che si intende adottare per il sistema oggetto della simulazione, possono essere inserite utilizzando l'interfaccia utente predisposta nell'ultimo foglio di lavoro della serie.<sup>34</sup>

Consideriamo, per il momento, l'organizzazione dei parametri di simulazione nell'interfaccia mostrata in figura 4.13, che rappresenta il modello di base delle strategie di manutenzione previste per i componenti.<sup>35</sup>

**Slow mode: maintenance policy** politica di manutenzione adottata per la condizione di preguasto.<sup>36</sup> È possibile introdurre interventi di manutenzione correttiva o predittiva.

**Time to get maintenance organized** questo campo fornisce la distribuzione di probabilità da cui viene estratto un primo valore di ritardo logistico: il tempo necessario ad organizzare le operazioni di manutenzione.

**Detect mode** serve per specificare la modalità con cui l'innescò del guasto viene rilevato. Non sempre è possibile riconoscere immediatamente l'insorgere di una condizione di guasto. Si pensi, per esempio, ai componenti aeronautici, tipicamente progettati con ridondanze per irrobustirne l'affidabilità ed aumentare la sicurezza complessiva del volo. È lecito aspettarsi, che nel caso di guasto di un elemento protetto da ridondanze, ed in assenza di sistemi di autodiagnosi, la funzionalità dell'aeromobile non venga compromessa. In tali condizioni il pilota potrebbe non percepire la situazione di allarme e sarebbe naturalmente portato a proseguire la missione ignaro di avere esaurito le proprie risorse di affidabilità. A maggior ragione le condizioni di preguasto

---

<sup>34</sup>Si ricorda che i dati di sistema vengono suddivisi in 5 fogli di lavoro, e precisamente nel controllo di sistema, nella matrice di affidabilità, nella gestione delle dipendenze, nelle condizioni di carico e nella politica di manutenzione.

<sup>35</sup>Il caso dei sottosistemi viene trattato in seguito.

<sup>36</sup>Si ricorda che il modo lento di guasto indica l'insorgere di una condizione critica che porterà alla rottura dopo un certo tempo (per esempio una vibrazione anomala).

R.A.M.S.E.S.										
1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1	Element n° 1									
2	Failure Up Mode n° 1									
3	Slow mode: Maintenance policy (1-3):			3	Preventive Maintenance					
4	Time to get maintenance organized			(1-5): 1	Fixed					
5	Parameters			Value: 0						
6	Detect mode			(1-3): 1	Immediate detection					
7	System status during maintenance operations:				Main Active		Local Passive			
8	Maintenance actions before complete substitution				32000					
9	Substitution time			(1-5): 3	Normal					
10	Parameters			$\mu$ : 100	$\sigma$ : 20					
11	Substitution personnel requested:		1	Professional Profile: 2			Quantity: 1			
12	How many preventive maintenance periods?			2						
13	Plan n° 1	From: 0		To: 5000						
14	Maintenance programmed every			1000	time units					
15	Plan n° 2	From: 5000		To: Last Unit						
16	Maintenance programmed every			500	time units					
17	Fast mode: Maintenance policy (1-4):			2	Corrective Maintenance					
18	Time to get maintenance organized			(1-5): 4	Lognormal					
19	Parameters			$X_0$ : 50	$\mu$ : 1		$\sigma$ : 0.3			
20	Detect mode			(1-3): 1	Immediate detection					
21	System status during maintenance operations:				Main Active		Local Passive			
22	Maintenance actions before complete substitution				32000					
23	Substitution time			(1-5): 3	Normal					
24	Parameters			$\mu$ : 100	$\sigma$ : 20					
25	Substitution personnel requested:		1	Professional Profile: 2			Quantity: 1			
26	First economic damage on failure			(1-5): 1	Fixed					
27	Parameters			Value: 1000						
28	People damage due to Failure:		100	People damage while component is down: 0.1						

Figura 4.13: Interfaccia di predisposizione della politica di manutenzione

(esempio la nascita di una cricca in un vessel di un reattore nucleare), per la loro tipica insidiosità dovuta alle difficoltà di rilevazione, necessitano di strumenti adeguati a manifestarne la presenza. In pratica si ricorre all'utilizzo di opportuni segnali di allarme e alla pianificazione di ispezioni periodiche.

Il codice è stato programmato per gestire le strategie di rilevazione basate sull'utilizzo di allarmi, sulle ispezioni, oppure sul riconoscimento immediato del guasto. Nel caso degli allarmi, viene semplicemente richiesto l'indice del componente che provvede ad effettuare il controllo sul corretto funzionamento dell'elemento critico. In caso di innesco del guasto si verifica lo stato del componente che funge da allarme. Se quest'ultimo è funzionante, allora il segnale viene regolarmente inviato e si procede alla manutenzione, viceversa la manutenzione non potrà essere eseguita. Nel caso delle ispezioni periodiche, al tempo programmato, si verifica lo stato dell'elemento critico. Se quest'ultimo risulta inefficiente, si procede all'intervento di riparazione.

**Sytem status during maintenance operations** queste due celle vengono utilizzate per segnalare la necessità di disattivare il sistema nel suo complesso (Main), oppure il singolo sottosistema che contiene l'elemento corrente (Local), mentre è in corso la manutenzione.

**Maintenance actions before complete substitution** specifica il numero di interventi che possono essere effettuati sul componente prima che si renda necessario procedere alla sua completa sostituzione con un pezzo nuovo.<sup>37</sup>

**Substitution time** campo per la distribuzione di probabilità da utilizzare per l'estrazione del tempo necessario ad effettuare la sostituzione del componente.

**Substitution personnel** viene indicato il numero delle diverse qualifiche professionali richieste per svolgere l'intervento di sostituzione del pezzo e la quantità di addetti necessaria per ognuna di queste.

**How many preventive maintenance periods?** numero dei periodi di manutenzione preventiva che si susseguono lungo il corso della simulazione.<sup>38</sup>

**Plan n° From To** estremi temporali che individuano il periodo  $j$ . In rispetto alla logica generale, il campo **From** viene impostato automaticamente al valore 0, oppure al termine del periodo precedente.

**Maintenance programmed every** questo campo specifica il tempo che intercorre tra una manutenzione preventiva e l'altra, all'interno del periodo corrente. Per fare un esempio, si può dividere la simulazione in due periodi, nel primo dei quali sia sufficiente effettuare un intervento di manutenzione preventiva ogni diecimila unità di tempo, mentre nel secondo dei quali occorra effettuare gli interventi ogni cinquemila unità. I fenomeni di usura e invecchiamento dei componenti, unitamente al sopravvento di una condizione di carico più gravosa, possono giustificare l'infittimento della frequenza di manutenzione con il tempo.

Il caso più semplice della sola manutenzione correttiva contempla i parametri sopra descritti, ad eccezione dei campi relativi alla manutenzione preventiva.

Consideriamo, ora, le ultime righe di figura 4.13, che riguardano il danno causato dall'evento di guasto.

**First economic damage on failure** indica la distribuzione di probabilità da cui estrarre un valore del danno economico che viene causato dagli effetti della rottura.

**People damage due to failure** stima dell'entità del danno causato alle

---

<sup>37</sup>Questo campo viene impostato, per default, ad un valore molto alto, che corrisponde alla possibilità di effettuare un numero infinito di interventi.

<sup>38</sup>Questa voce è attiva soltanto nel caso di manutenzione proattiva di tipo preventivo.

persone nell'istante in cui avviene la rottura.

**People damage while component is down** valutazione del danno che viene causato alle persone, a seguito di un prolungato periodo di inefficienza del componente in esame.<sup>39</sup>

R.A.M.S.E.S.										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Element n° 1									
2	Failure Up Mode n° 1									
3	Slow mode: Maintenance policy (1-3):				1	No Maintenance				
4	Fast mode: Maintenance policy (1-4):				4	Maintenance On Slow Failure				
5	Time to get maintenance organized				(1-5): 1	Fixed				
6	Parameters				Value: 0					
7	Detect mode			(1-3): 3	Detection by inspection					
8	System status during maintenance operations:				Main Active		Local Active			
9	Maintenance actions before complete substitution				32000					
10	Substitution time				(1-5): 3	Normal				
11	Parameters				$\mu$ : 100	$\sigma$ : 20				
12	Substitution personnel requested:		1	Professional Profile: 7			Quantity: 1			
13	How many inspection periods? 2									
14	Inspection 1		From: 0		To: 5000		Cycles: 1			
15	Cycle 1 programmed every		1000	time units on system		Active	& element Active			
16	Time Requested for the Inspection				(1-5)	4 Lognormal				
17	Parameters				$X_0$ : 10	$\mu$ : 1		$\sigma$ : 0.2		
18	Inspection Personnel Requested		1	Professional Profile: 2			Quantity: 1			
19	Cost of the Inspection 1500									
20	Inspection 2		From: 5000		To: Last Unit		Cycles: 1			
21	Cycle 1 programmed every		500	time units on system		Active	& element Active			
22	Time Requested for the Inspection				(1-5)	4 Lognormal				
23	Parameters				$X_0$ : 10	$\mu$ : 1		$\sigma$ : 0.2		
24	Inspection Personnel Requested		1	Professional Profile: 2			Quantity: 1			
25	Cost of the Inspection 1500									
26	First economic damage on failure				(1-5): 1	Fixed				
27	Parameters				Value: 2000					
28	People damage due to Failure:				0	People damage while component is down: 100				

Figura 4.14: Interfaccia di predisposizione della politica di manutenzione — Ispezioni periodiche

Consideriamo ora, relativamente alla figura 4.14, i campi che descrivono le ispezioni.

**How many inspection periods?** numero di periodi programmati per le ispezioni.

**Inspection 1 , From , To e Cycles** questa riga contiene gli estremi

<sup>39</sup>Per fare un esempio, si immagina il guasto di una guarnizione per un serbatoio di gas tossici, che provoca un danno continuo alle persone che respirano il gas diluito nell'aria.

temporali che individuano il periodo corrente di ispezione ed il numero di cicli di diversa durata che sono previsti all'interno del periodo stesso.

**Cycle 1 programmed every** intervallo di tempo fra due ispezioni successive. Per capire meglio la logica implementata nel codice conviene fare qualche esempio.

1. Si abbia un unico periodo di ispezione composto da due cicli in cui gli intervalli specificati valgono, rispettivamente, 1000 e 500 unità di tempo. In queste condizioni le ispezioni vengono effettuate alle scadenze dei tempi seguenti: 1000, 1500, 2500, 3000, 4000, 4500 ...
2. Si abbiano ora, invece, due periodi di ispezione caratterizzati da un unico ciclo. La simulazione abbia una durata di 10000 unità; il primo periodo sia fissato da 0 a 5000 unità; il secondo da 5000 fino al termine. La durata del ciclo del primo periodo sia di 2500 unità, mentre il ciclo del secondo periodo sia programmato ogni 1000 unità di tempo. In questo caso le ispezioni vengono attivate ai tempi seguenti: 2500, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000, 10000.

**System Active & element Active** queste due celle dispongono la disattivazione dell'elemento corrente, o del sottosistema di cui fa parte, per la durata dell'intervento di ispezione.

**Time requested for the inspection** indica il tipo di distribuzione di probabilità da utilizzare per l'estrazione del tempo impiegato ad effettuare l'ispezione.

**Inspection personnel requested** questo campo specifica gli addetti necessari all'ispezione.

**Cost of the inspection** costo totale dell'intervento di ispezione.

Si osservi che in figura 4.14 si mostra un esempio di piano di manutenzione proattivo di tipo predittivo. L'intervento di manutenzione, in questo caso, viene effettuato a condizione che si sia verificato l'innescò del guasto.<sup>40</sup> In particolare, si mostra come sia possibile rilevare la condizione di preguasto attivando un programma di ispezioni periodiche.

Concludiamo la descrizione della logica di manutenzione presentando il caso dei sottosistemi, per i quali possono essere specificate delle condizioni aggiuntive secondo lo schema di figura 4.15.

La logica adottata considera i sottosistemi come delle unità funzionali che possano essere sostituite in blocco. Prendiamo in considerazione l'esempio del motoriduttore di figura 4.16, che è un tipico caso di unità funzionale

---

<sup>40</sup>Nell'ambito della curva di guasto potenziale il componente sta già transitando all'interno della zona di preguasto.

R.A.M.S.E.S.									
File Modifica Visualizza Inserisci Formato Strumenti Dati Finestra ?									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Subsystem <b>1</b>								
2	Maintenance policy (1-3):			2	Corrective Maintenance				
3	Time to get maintenance organized				(1-5): 1	Fixed			
4	Parameters Value: 0								
5	Detect mode (1-3): 1			Immediate detection					
6	System status during maintenance operations:					Main Active	Local Active		
7	Substitution time				(1-5): 4	Lognormal			
8	Parameters $X_0: 80$ $\mu: 1$ $\sigma: 0.3$								
9	Substitution personnel requested: 1		Professional Profile: 7				Quantity: 1		
10	Spare parts requested: 2		Type: 1				Quantity: 1		
11			Type: 2				Quantity: 1		
12	First economic damage on failure				(1-5): 1	Fixed			
13	Parameters Value: 1000								
14	People damage due to Failure: 100		People damage while component is down: 0.2						

Figura 4.15: Attività di manutenzione aggiuntive per i sottosistemi

di sistemi più complessi, costituita da componenti elementari quali alberi, linguette, ruote dentate e cuscinetti. Essendo i ratei di guasto di questi ultimi pezzi in genere noti, ha senso modellare il motoriduttore come un sottosistema. A questo punto si può allora effettuare la manutenzione su due livelli:



Figura 4.16: Esempio di sottosistema — motoriduttore

o si ripara la singola parte guasta, o si sostituisce l'intero motoriduttore. Il codice gestisce anche questa seconda strategia, la cui applicazione deve semplicemente essere decisa in base a criteri di convenienza economica. Vediamo ora una breve descrizione dei campi visualizzati in figura 4.15.

**System status during maintenance operations** indica la necessità di disattivare il sottosistema che contiene il blocco in esame (Local) o il sistema principale (Main).

**Substitution time** tempo necessario a sostituire l'unità. Come sempre, vengono specificati il tipo di distribuzione di probabilità da utilizzare ed i parametri relativi.

**Substitution personnel requested** personale addetto alla sostituzione del sottosistema.

**Spare parts requested** pezzi di ricambio richiesti per la sostituzione. Nel caso di figura 4.16, per esempio, andrebbe specificato l'indice del pezzo che corrisponde ai riduttori di ricambio disponibili in magazzino.

## 4.6 Diagrammi dei risultati di simulazione

In questa sezione presentiamo una sintetica descrizione delle diverse tipologie di risultati che è possibile ottenere dalla simulazione numerica e che vengono automaticamente forniti in forma grafica dal codice RAMSES.

### 4.6.1 Disponibilità del sistema

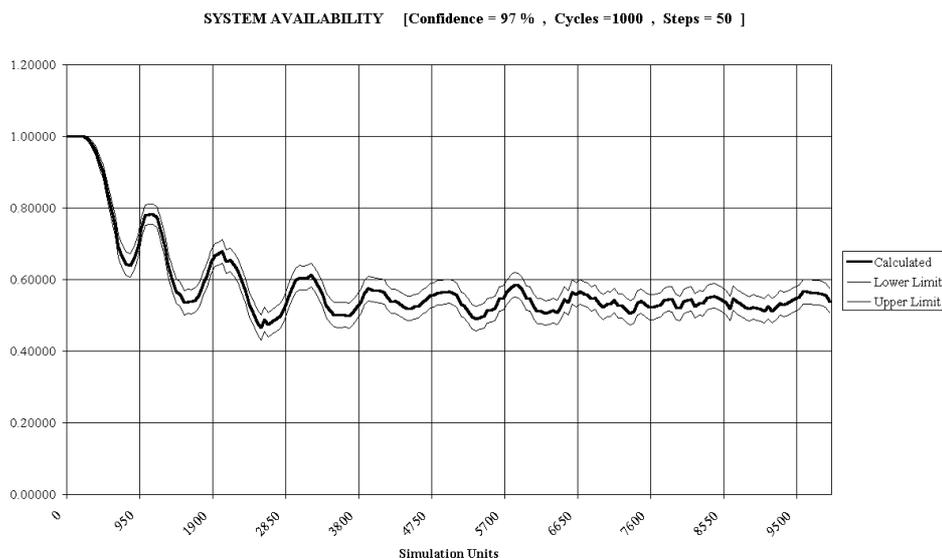


Figura 4.17: Disponibilità di sistema — un componente; rateo di guasto costante ( $MTTF = 3000$ ); manutenzione correttiva ( $MTTR = 2450$ ); disponibilità asintotica= 0.55

Consideriamo la figura 4.17, in cui si mostra l'andamento della disponibilità del sistema. In ascissa viene indicato il tempo della simulazione, mentre in ordinata si leggono i valori della disponibilità  $\mathcal{D} \in [0, 1]$ . In sintesi, se al tempo di 2850 unità si legge il valore 0.58, per esempio, significa che il sistema ha probabilità del 58% di essere funzionante al tempo considerato.

Allo stesso modo, se il sistema viene prodotto in serie, come può essere per le automobili, si può dire che al tempo considerato il 58% degli automezzi sarà funzionante, mentre il restante 42% presenterà guasti tali da compromettere l'integrità delle vetture.

Il valore calcolato della disponibilità corrisponde alla linea centrale, fra le tre che vengono visualizzate nel grafico. Le rimanenti due sono disegnate in corrispondenza del valore di confidenza che si desidera avere dalla simulazione. Nel caso in esame è stata specificata una confidenza del 97%. Questo significa che, nel 97% dei casi, il valore atteso della disponibilità resta compreso tra il limite inferiore e quello superiore dell'intervallo di confidenza. In altre parole si potrebbe dire che per il 3% della durata della simulazione, il profilo reale esce dalla fascia di confidenza, mentre per il 97% del tempo resta confinato al suo interno. È chiaro, che una volta fissata la confidenza, si otterranno bande tanto più strette quanto più elevato è il numero di cicli Monte Carlo effettuati.<sup>41</sup>

#### 4.6.2 Costo di esercizio

Questo grafico rappresenta l'andamento dei costi in funzione del tempo di vita del sistema. In particolare, le ordinate corrispondono alla somma di tutte le spese effettuate dall'inizio della simulazione fino al tempo considerato. In figura 4.18, per esempio, si mostra il profilo che si ottiene con un solo componente, caratterizzato da un rateo di guasto crescente e da un certo periodo di *vita sicura al guasto*. Si osservi che il costo resta nullo durante il primo periodo della vita del pezzo, in quanto non si hanno rotture per almeno mille unità, poi comincia a crescere con andamento parabolico, essendo il tasso di guasto crescente nel tempo. Questo è motivato dalla maggiore frequenza delle rotture e delle conseguenti manutenzioni, che comportano delle spese. Si noti, inoltre, che tra le 4750 e le 5700 unità la pendenza del grafico cala decisamente. Se ne deduce che, in questo periodo, risulta molto probabile la sostituzione del pezzo, con una conseguente stasi del costo dovuto al tempo di vita sicura al guasto del componente nuovo pari a 1000 unità.

#### 4.6.3 Rischio di esercizio

Il grafico del rischio indica, per ogni singolo istante di tempo, il prodotto del danno alle persone per la frequenza dell'evento che genera il danno stesso. Vengono presi in considerazione due tipi di eventi: il singolo momento

---

<sup>41</sup> Ampiezza dell'intervallo di confidenza

$$\delta = z \sqrt{\frac{\mathcal{R}(1-\mathcal{R})}{\mathcal{N}_{cicli}}}$$

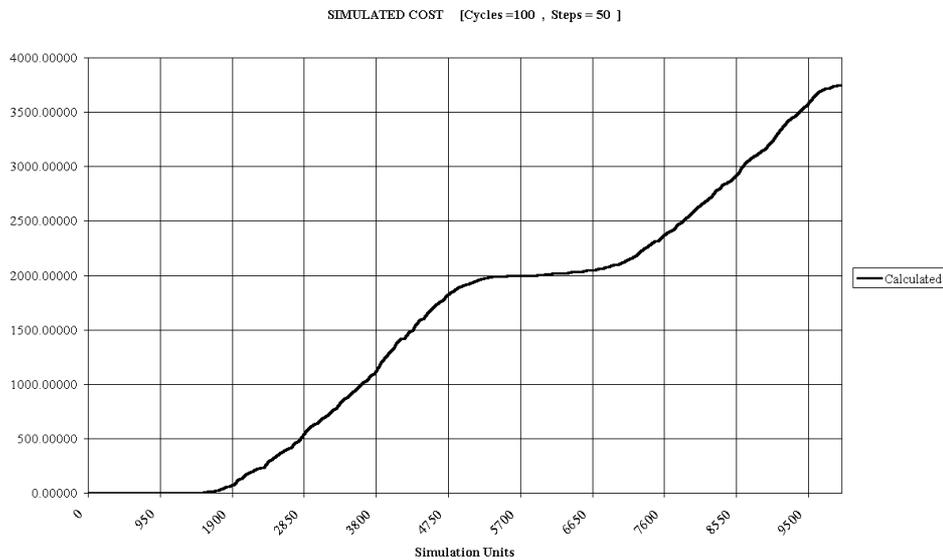


Figura 4.18: Costo di esercizio — un componente; *Weibull* p.d.f. ( $X_0 = 1000$   $\beta = 5$   $\vartheta = 2000$ ; manutenzione correttiva con rinnovo al 30% e sostituzione al terzo intervento

della rottura di un pezzo e il periodo in cui, in attesa della manutenzione, un componente rotto continua a provocare danni. Per il primo caso si può portare l'esempio di una rottura esplosiva, per il secondo si può pensare ad un malfunzionamento del dispositivo di messa a terra di un'apparecchiatura elettrica.<sup>42</sup>

Le figure 4.19 e 4.20 sono relative allo stesso componente, con gli stessi parametri di guasto e di manutenzione, ma con caratteristica del danno, rispettivamente, continuativo ed istantaneo.

È possibile inserire contemporaneamente valori non nulli per entrambi gli indici di danno, al fine di simulare situazioni del tipo esplosivo, con conseguenti perdite durature nel tempo. Bisogna sottolineare, infine, che questo tipo di grafico accumula tutte le situazioni di rischio che si presentano per il sistema in esame, per cui, nel caso si volesse individuare la criticità di un elemento in particolare, conviene azzerare i parametri del danno per tutti gli altri componenti, ottenendo, in tal modo, il profilo di rischio relativo al solo elemento desiderato.

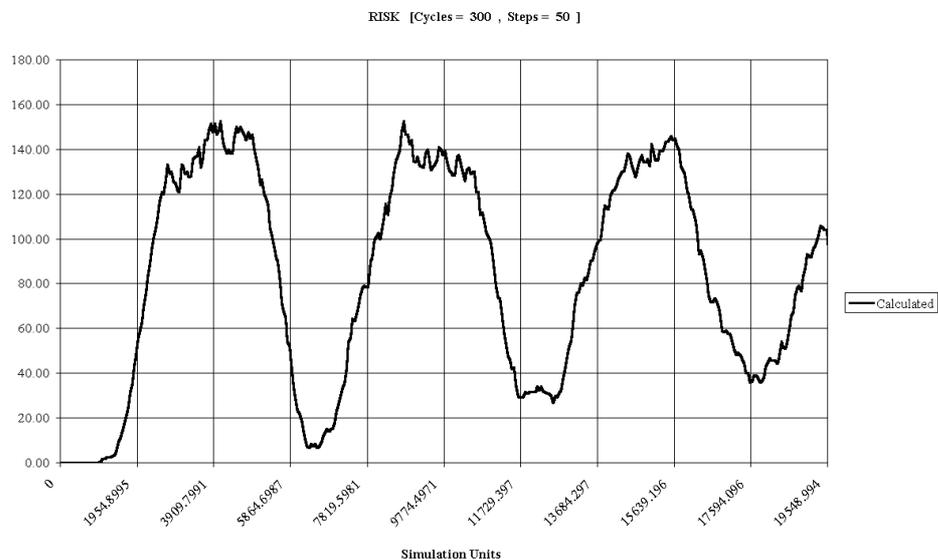


Figura 4.19: Rischio di esercizio — un componente; *Weibull* p.d.f. ( $X_0 = 500$   $\beta = 5$   $\vartheta = 2000$ ); manutenzione correttiva con rinnovo al 20%; sostituzione al terzo intervento; indice di danno *continuativo*=5

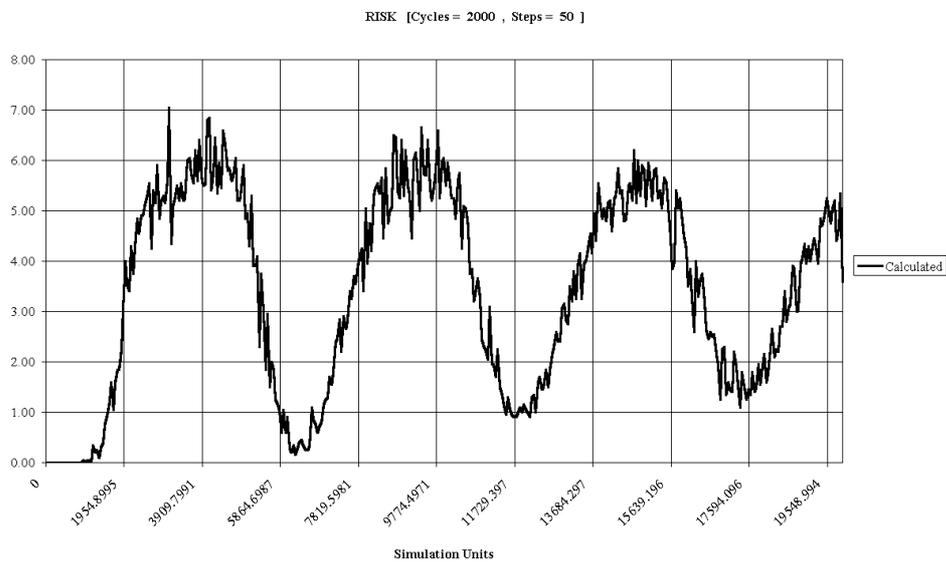


Figura 4.20: Rischio di esercizio — un componente; *Weibull* p.d.f. ( $X_0 = 500$   $\beta = 5$   $\vartheta = 2000$ ); manutenzione correttiva con rinnovo al 20%; sostituzione al terzo intervento; indice di danno *istantaneo*=100

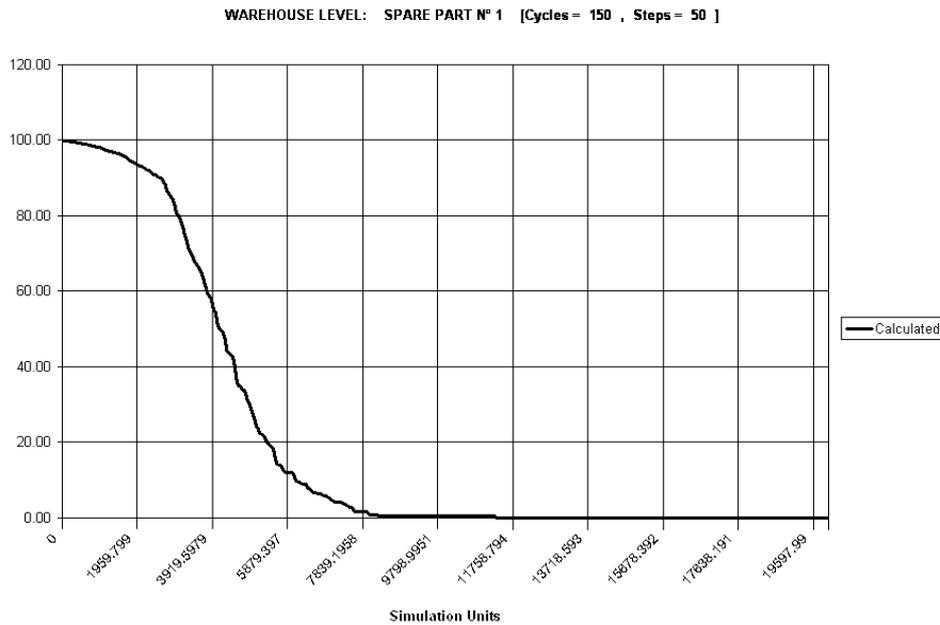


Figura 4.21: Livello di magazzino — sistema isolato

#### 4.6.4 Disponibilità dei pezzi di ricambio

Il grafico che si ottiene indica l'andamento in funzione del tempo, del livello di magazzino del pezzo considerato. In figura 4.21 si vede un esempio per un sistema costituito da un unico componente, con tasso di guasto crescente nel tempo, soggetto a interventi di riparazione che comportano l'utilizzo di un pezzo di ricambio. Nel caso raffigurato il sistema è isolato, per cui i pezzi vengono utilizzati fino al completo esaurimento delle scorte.<sup>43</sup>

In figura 4.22, invece, si può vedere l'effetto dell'introduzione del livello di soglia, sotto al quale viene inviato l'ordine per ripristinare la quantità iniziale.

È bene osservare che il grafico di figura 4.22 si mantiene ben al di sopra della soglia di riordino. La motivazione di questo fenomeno risiede nella natura della simulazione numerica dei processi stocastici. In pratica ogni storia Monte Carlo mantiene una propria identità, evolvendo secondo uno qualsiasi degli infiniti modi possibili. È naturale aspettarsi, quindi, che l'istante di tempo al quale si rende necessario il riordino sia diverso da storia

<sup>42</sup>Per semplicità non si considera il fattore di esposizione al danno.

<sup>43</sup>Per i sistemi isolati non è previsto il riordino. Le risorse disponibili sono ad esaurimento.

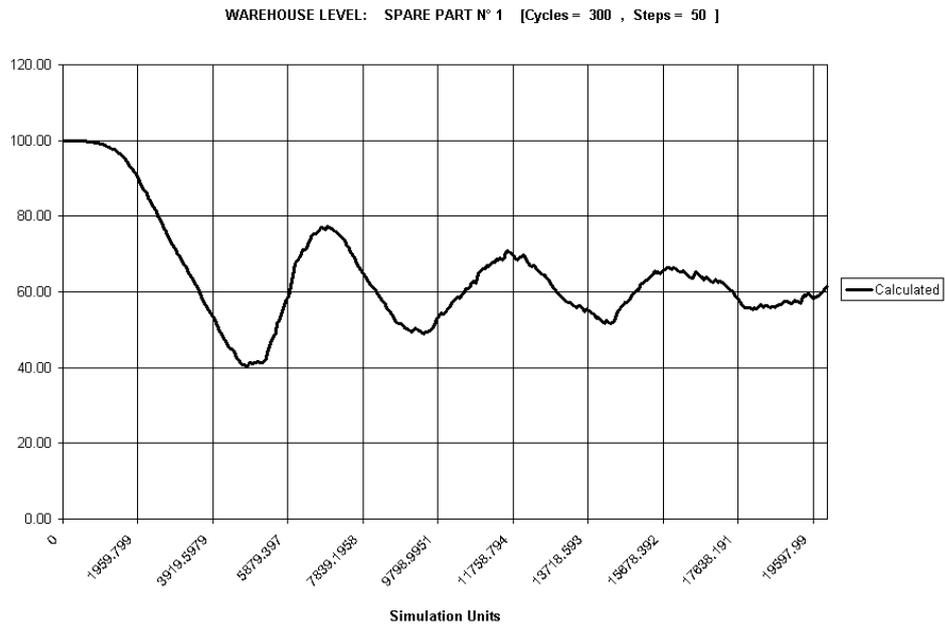


Figura 4.22: Livello di magazzino — soglia minima di riordino pari a 20 unità

a storia. Il risultato finale rappresenta la media dei livelli di magazzino delle singole storie e pertanto si manterrà sempre maggiore o uguale alla soglia di riordino.<sup>44</sup>

L'informazione essenziale che si deve dedurre dal grafico della disponibilità di magazzino non risiede tanto nel valore assoluto del livello delle scorte, bensì nella possibilità di individuare a priori i periodi di maggiore carenza ed i periodi di sovrabbondanza. Risulta chiaro, che tali informazioni sono di importanza capitale nell'ottimizzazione della gestione del magazzino, volta alla riduzione degli sprechi senza intaccare la disponibilità e quindi la produttività del sistema.

#### 4.6.5 Disponibilità della manodopera

Concludiamo la rassegna con il grafico della disponibilità del personale di officina. Il profilo che si ottiene indica, per ogni istante di tempo, il numero medio di uomini pronti all'intervento.

<sup>44</sup>Questo è rigorosamente vero solo se la consegna dei pezzi è istantanea. Al contrario, se i ritardi di consegna sono apprezzabili rispetto al tempo medio al guasto del componente, sarà possibile osservare il livello delle scorte scendere al di sotto della soglia.

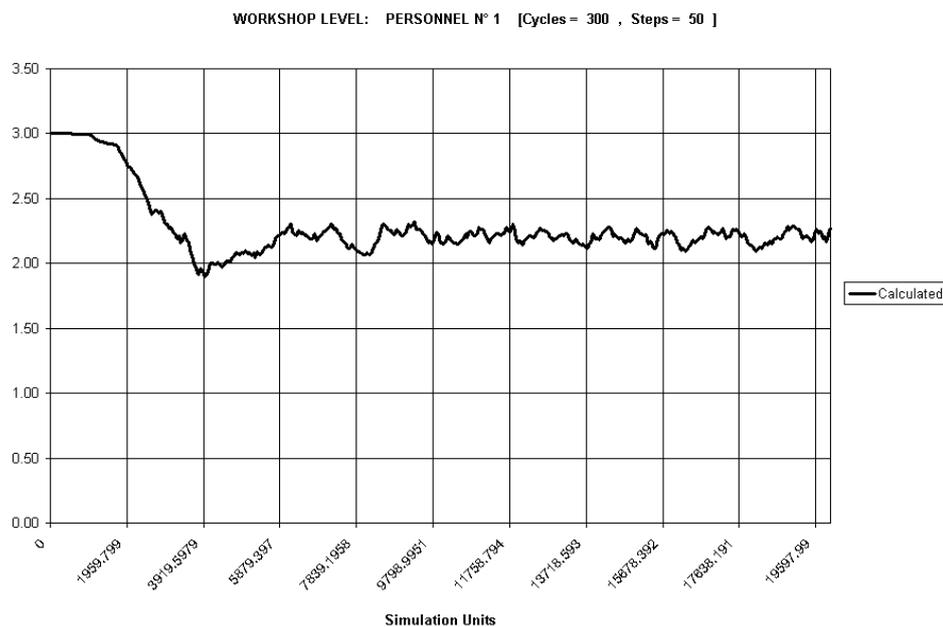


Figura 4.23: Disponibilità di manodopera

L'esempio di figura 4.23 è relativo ad un sistema composto da un parallelo di due componenti, che necessitano di due persone in caso di manutenzione. Ipotizzando che la squadra di manutenzione sia composta da 3 specialisti, nelle condizioni reali di lavoro soltanto 2 alla volta risulterebbero impegnati,<sup>45</sup> pertanto la quantità di manodopera disponibile dovrebbe oscillare tra i valori discreti 1 e 3. La simulazione, invece, calcola la media dei profili ottenuti dalle singole storie,<sup>46</sup> in questo caso trecento, per cui si vede che, in media, risultano sempre disponibili almeno due uomini. Se non si tenesse in conto l'effetto della media, la lettura del grafico potrebbe erroneamente suggerire di ridurre il personale ad una sola unità, provvedimento che comporterebbe l'impossibilità di effettuare le manutenzioni. Un migliore utilizzo di questo grafico, invece, può essere quello di dedurre i periodi di maggiore richiesta di manodopera per organizzare al meglio i turni di lavoro.

Questo problema è decisamente interessante nel caso dei guasti catastrofici, che per loro natura sono rari (si spera!), ma a causa dell'entità dei danni e della gravità delle conseguenze richiedono l'intervento di numerosi specialisti di manutenzione. La situazione è potenzialmente pericolosa per la

<sup>45</sup>Nell'ipotesi di non sovrapposizione degli interventi di manutenzione sui due componenti.

<sup>46</sup>Il diagramma di una singola storia, in effetti, oscilla con discontinuità fra i valori discreti 1 e 3.

simulazione numerica e deve essere valutata con molta cura. Ancora una volta, infatti, l'effetto della media porterebbe a dedurre che un elevato numero di persone se ne resta sempre in 'panciolle' in officina, con il conseguente ed erroneo discredito del ruolo della squadra di intervento di emergenza. In questo caso, un'analisi accurata suggerirebbe di considerare il profilo del rischio di esercizio, in modo tale da mantenere in allerta la squadra soltanto durante i periodi che oltrepassano la soglia di criticità ritenuta accettabile.

## 4.7 Strategie di simulazione

### 4.7.1 Gestione del tempo e degli eventi

Il codice RAMSES utilizza la tecnica del *salto nel tempo*,<sup>47</sup> che sfrutta la previsione degli eventi futuri e sposta le lancette del cronometro della simulazione in corrispondenza del tempo di esecuzione del prossimo evento.<sup>48</sup>

Per una migliore comprensione del processo di simulazione si fornisce qui di seguito una sintetica descrizione delle diverse tipologie di eventi possibili.

**Preguasto o condizioni di funzionamento degradato** gli eventi di preguasto non hanno un effetto istantaneo sullo stato del sistema, se non quello di far transitare il componente interessato all'interno della zona di guasto potenziale. Questo comporta l'attivazione del modello  $\mathcal{P} \mapsto \mathcal{F}$  (cfr. al 2.4.3) e l'estrazione del tempo al guasto effettivo secondo quanto descritto nel punto successivo.

**Guasto di un componente** gli eventi di guasto rientrano nella logica di previsione del futuro del sistema. In pratica, per ogni elemento si elaborano i parametri delle condizioni di carico che descrivono l'andamento del rateo di guasto in funzione del tempo e delle singole fasi della missione.<sup>49</sup>

**Propagazione dei guasti** l'esecuzione di questo evento è immediata, con l'effetto di produrre una catena incidentale che si propaga istantaneamente dall'elemento iniziatore  $i$  della catena a tutti e soli gli anelli che lo seguono. Anche in questo caso sono in programma sviluppi futuri

---

<sup>47</sup>Si veda la descrizione dei meccanismi di avanzamento della simulazione nella sezione 3.3.

<sup>48</sup>Gli eventi (guasti, manutenzioni ...) influiscono pesantemente sull'evoluzione del sistema. Per questo la previsione del futuro deve essere ripetuta dopo l'esecuzione di ogni singolo evento.

<sup>49</sup>Tecnica di estrazione del tempo al guasto e teoria dell'età (cfr. al 4.7.4).

del codice che introducano la possibilità di rallentare la sequenza dell'incidente inserendo tempi di ritardo come variabili aleatorie definite da opportune distribuzioni di probabilità. Questa estensione diventa estremamente interessante per il caso dell'aeronautica militare, dove si rende necessario valutare il rischio delle missioni individuando le possibili catene incidentali ed intervenendo con le opportune azioni correttive sugli anelli deboli. A tal fine, la simulazione numerica di una sequenza incidentale intervallata da tempi di ritardo realistici che possano consentire la reazione correttiva del pilota, può aiutare a mettere in luce gli anelli effettivamente deboli rispetto agli anelli meno critici.

**Manutenzione correttiva** questo intervento viene attivato automaticamente dall'evento di guasto nel caso in cui la rilevabilità sia immediata (caso di guasti palesi). Nel caso di guasti nascosti, invece, si possono presentare tre alternative:

1. esiste un sistema di diagnostica, o sistema di allarme
2. esiste un piano di ispezioni programmate
3. non è prevista nessuna delle attività di cui ai punti precedenti

Nel primo caso l'evento di manutenzione correttiva viene attivato soltanto se il componente che funge da sistema diagnostico è funzionante.<sup>50</sup> Nel secondo caso, l'evento di manutenzione viene momentaneamente ignorato. Sarà il prossimo evento di ispezione a rilevare il guasto e a forzare per conseguenza l'intervento di riparazione. Nel terzo caso, infine, l'evento di manutenzione viene totalmente ignorato, in quanto il sistema non è in grado di accorgersi del guasto.

È importante sottolineare, che a seguito dell'intervento di riparazione è possibile riconfigurare il componente con soluzione di continuità fra i due casi estremi *as bad as old* e *as good as new*. In tal senso l'età viene moltiplicata per la percentuale di rinnovo indicata nella scheda delle proprietà di manutenzione dei componenti (archivio dei componenti).

Per garantire la massima flessibilità nella simulazione, gli interventi di manutenzione vengono generalmente suddivisi nelle seguenti fasi:

1. pianificazione e smontaggio
2. riparazione
3. verifiche e controlli
4. rimessa in servizio

Le sostituzioni possono avvenire sia a livello di componente, sia a livello di sottosistema.

---

<sup>50</sup>Osserviamo, come è ovvio, che una spia rotta non è in grado di segnalare alcun guasto!

**Manutenzione preventiva** gli eventi di manutenzione preventiva vengono programmati all'inizio della simulazione in modo tale che siano attivati ad istanti di tempo ben precisi, indipendentemente dall'evoluzione del sistema. Sviluppi futuri del codice porteranno ad una gestione più flessibile e realistica di questo tipo di evento. In particolare sarà possibile tenere conto della storia pregressa (eventuali interventi di manutenzione correttiva) posticipando opportunamente le scadenze degli interventi programmati.<sup>51</sup>

**Ispezione** la gestione di questo tipo di evento è identica al caso precedente. All'inizio della simulazione viene impostato il piano di ispezioni periodiche. In questo caso non sussiste il problema dell'ottimizzazione dei tempi durante la simulazione, perchè sono le ispezioni stesse ad attivare gli opportuni interventi di manutenzione straordinaria, mantenendosi per conseguenza ovvia sempre correttamente distanziate. Per sviluppi futuri, tuttavia, è in programma l'implementazione di un evento di ispezione straordinaria, che potremmo chiamare *ricerca dei guasti nascosti* e che dovrebbe essere attivato in modo automatico a seguito del malfunzionamento del sistema. La funzione primaria delle ispezioni, infatti, non consiste solo nel rilevare eventuali condizioni di preguasto o di funzionamento degradato dei componenti, ma anche nell'individuare i cosiddetti *guasti nascosti*, particolarmente insidiosi in quanto, per loro natura, risultano generalmente protetti da ridondanze e quindi difficilmente rilevabili. È tipico, infatti, il caso di malfunzionamenti del sistema che non è possibile imputare alle cause responsabili senza avere effettuato le opportune operazioni di diagnostica.

**flusso dei pezzi di ricambio** riuniamo in questa voce gli eventi di gestione del magazzino, che comprendono l'uscita dei pezzi per le esigenze di manutenzione e l'arrivo dei pezzi a seguito della procedura di riordino. È possibile simulare la logistica dei sistemi isolati impostando la soglia di riordino a 0.<sup>52</sup>

**flusso della manodopera** come impostazione generale le risorse del sistema (ricambi e manodopera) vengono gestite secondo una logica comune. Il personale di officina viene impegnato per il tempo strettamente necessario ad eseguire gli interventi di manutenzione o le ispezioni periodiche. A differenza del caso precedente, come è ovvio, non esiste la procedura di riordino. Inoltre, ipotesi restrittiva ma accettabile, si suppone che la composizione della squadra di manutenzione (numero degli addetti) sia costante lungo tutta la durata della simulazione.<sup>53</sup>

---

<sup>51</sup>Sarebbe poco proficuo forzare a tutti i costi la sostituzione di un pezzo appena riparato, solo perchè l'intervento è previsto dal programma.

<sup>52</sup>Condizione di riordino sul livello  $\mathcal{L}$  dei ricambi:  $\mathcal{L} < \mathcal{L}_{soglia}$ .

<sup>53</sup>Prendiamo l'esempio delle caldaie a combustibile fossile delle centrali elettriche. In

La gestione del corretto ordine cronologico degli eventi viene effettuata con strutture a coda di tipo FIFO,<sup>54</sup> con operazioni di inserimento ed eliminazione di nodi. Facciamo qualche esempio. Consideriamo una pompa, soggetta a modo lento di guasto riconoscibile dall'insorgere di vibrazioni anomale. Al momento dell'innescare del guasto si estrae il tempo necessario a provocare la rottura definitiva (intervallo  $\mathcal{P} \mapsto \mathcal{F}$ ), e si inserisce la pompa, suo malgrado, nella coda dei morituri alla posizione che le compete. Nel frattempo, la vibrazione può essere rilevata da un apposito sensore che invia al sistema un segnale di allarme. A questo punto viene inserita nella coda degli interventi la procedura di manutenzione, con un valore del tempo che tiene conto del ritardo dovuto all'organizzazione dell'intervento stesso. Ciò comporta la presenza, nelle code, di due eventi in competizione tra loro, il primo dei quali, a seguito della propria esecuzione, provvederà ad eliminare il proprio antagonista. Se la riparazione della condizione di preguasto (es. riallineamento degli alberi) venisse effettuata prima del tempo corrispondente alla rottura, la pompa sarebbe salva e il nodo relativo, nella coda dei guasti, dovrebbe essere eliminato. Viceversa, se il guasto avesse luogo prima dell'inizio della manutenzione, quest'ultima dovrebbe essere cancellata dalla coda delle operazioni in programma. In tal caso, sempre se previsto dal piano di manutenzione, verrebbe attivata la procedura di organizzazione dell'intervento relativo alla rottura completa.

#### 4.7.2 Modello logico del sistema

Il sistema, al seguito di un'opportuna analisi funzionale, viene schematizzato utilizzando un diagramma a blocchi di affidabilità, che permette di determinarne lo stato di funzionamento complessivo, noti gli stati dei singoli elementi o sottogruppi. Le informazioni logiche contenute nel diagramma ci forniscono, in modo rapido ed intuitivo, un'idea sulle relazioni che intercorrono fra i componenti stessi e su come queste ultime interagiscono caratterizzando il comportamento globale del sistema. In figura 4.24 si mostra una tipica rappresentazione dello schema logico tramite diagramma a blocchi di affidabilità. Secondo questa notazione grafica, il sistema sarà in grado di assolvere la funzione richiesta se risulta possibile percorrere un qualsiasi tracciato che collega il primo e l'ultimo nodo, transitando solo attraverso componenti funzionanti.

Senza perdere di generalità, è possibile sintetizzare le informazioni raccolte nel diagramma a blocchi di affidabilità in una notazione matriciale, che risulta essere più conveniente per l'elaborazione. Osserviamo, per cominciare, che è possibile inserire dei nodi all'ingresso e all'uscita di ogni blocco,

---

questo caso il personale di manutenzione viene suddiviso in 3 o 4 turni, rispettivamente di 8 o 6 ore, al fine di garantire sempre la presenza di una squadra al completo.

<sup>54</sup>*First In First Out.*

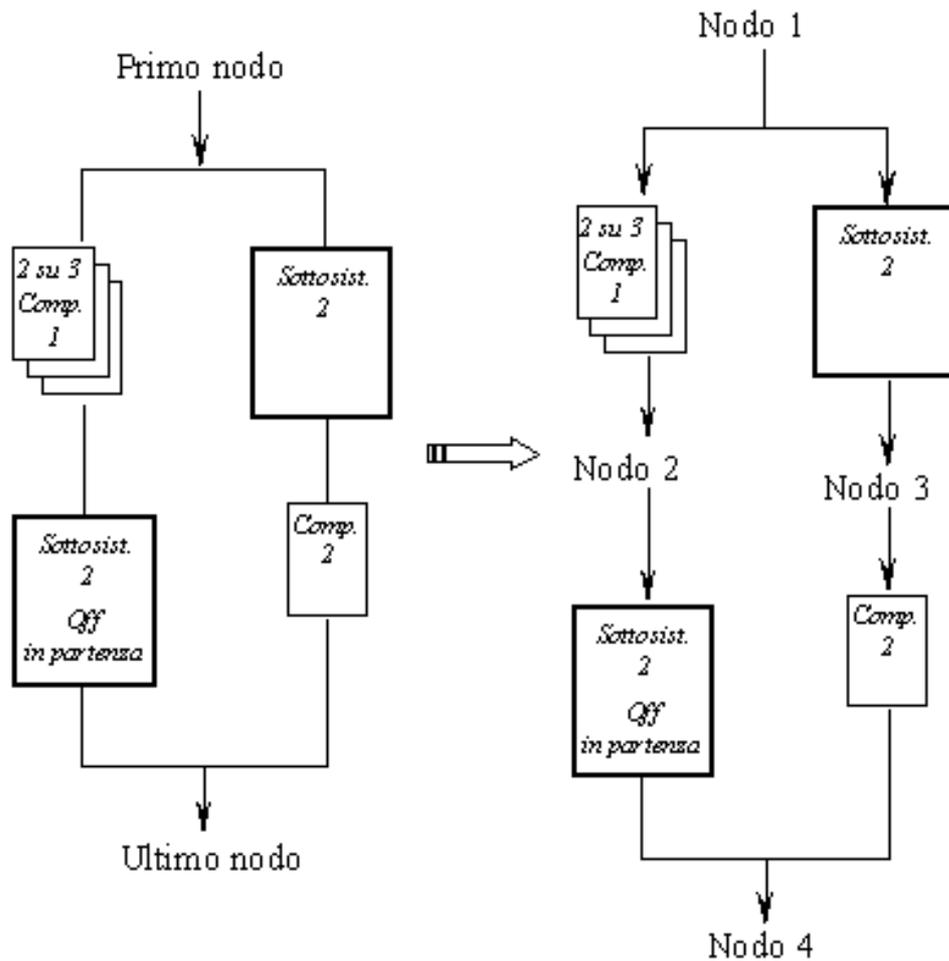


Figura 4.24: Diagramma a blocchi di affidabilità

come è stato fatto in figura 4.24. Si noti, quindi, che il diagramma è costituito da un insieme di tre oggetti fondamentali: gli elementi, i nodi e le linee di collegamento. È possibile descrivere una qualsiasi logica funzionale, comunque complessa, utilizzando un'opportuna combinazione di questi oggetti di base.

Per costruire la matrice di affidabilità, associamo le righe ai nodi e le colonne agli elementi. Le linee di collegamento, invece, vengono codificate da opportuni valori inseriti nelle singole celle della matrice. Ogni cella indica, infatti, la relazione che intercorre tra il nodo  $i$  e l'elemento  $j$ , per cui si è deciso di adottare un valore positivo per indicare l'esistenza di un collegamento diretto dal nodo verso il componente ed un valore negativo per indicare un collegamento diretto in senso opposto. Un valore nullo indica

l'assenza di qualsiasi collegamento. In figura 4.9 abbiamo già visto come si presenta la matrice di affidabilità relativa al diagramma di figura 4.24.

Facciamo ora un esempio pratico su come deve essere schematizzato un sistema di pompaggio realizzato con due componenti pompa su linee parallele, nel caso di due profili di missione differenti. Siano le pompe identiche e di portata massima corrispondente a  $1l/s$ . Nel primo caso si desidera, come requisito funzionale della missione, una portata complessiva minima pari a  $0.9l/s$ , mentre nel secondo caso supponiamo che sia richiesta l'erogazione di almeno  $1.1l/s$ . Sotto queste condizioni, la logica di funzionamento corretta prevede un parallelo di due elementi nella prima situazione e una serie nella seconda. Per quest'ultimo caso, infatti, il guasto di una qualsiasi delle due pompe compromette la capacità dell'intero sistema di fare fronte alla portata richiesta. In pratica, la disposizione fisica dei componenti non deve necessariamente rispecchiare la disposizione logica ai sensi dell'affidabilità.

Dal punto di vista della logica di funzionamento, è inoltre possibile simulare le ridondanze passive, costituite da relazioni di tipo *stand by*, e lo sviluppo di catene incidentali a seguito della propagazione dei guasti. Si faccia riferimento alla sezione 4.5.4 per una descrizione puntuale della relativa interfaccia di inserimento dati. Il codice è in grado di elaborare *stand by* **master slave** o **simmetrici**.

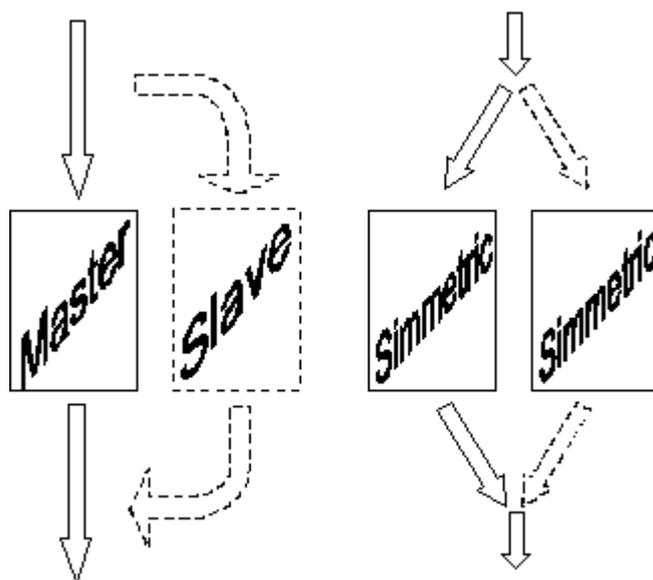


Figura 4.25: Ridondanze passive — stand by master-slave e stand by simmetrico

**Stand by Master Slave** Come si vede in figura 4.25, la logica è molto

semplice: il *master* resta sempre in funzionamento, mentre lo *slave* si mantiene in attesa. In caso di guasto sul *master* si attiva lo *slave* e si organizza la manutenzione. Al termine della riparazione lo *slave* viene disattivato ed il *master* riprende a funzionare. Per istruire il codice sull'esempio di figura è sufficiente introdurre una dipendenza di tipo *stand by* dell'elemento *slave* nei rispetti dell'elemento *master*.

**Stand by simmetrico** In questo caso entrambi gli elementi presentano le caratteristiche di *slave*, per cui occorre inserire la dipendenza di *stand by* del primo sul secondo e del secondo sul primo. Agli effetti della simulazione, un componente viene attivato solo in seguito al guasto dell'altro.

Le applicazioni della logica *master slave* sono in genere legate alla necessità di introdurre ridondanze per componenti molto costosi e particolarmente critici ai sensi della sicurezza e della produttività. In questi casi si preferisce affiancare un sistema ausiliario con prestazioni e costi inferiori che entri in funzione soltanto a seguito del guasto del primario o durante gli interventi di manutenzione programmata. Al contrario, se il costo del componente è trascurabile in confronto alla perdita di produttività che si avrebbe a fronte di eventuali malfunzionamenti, risulta senz'altro conveniente adottare la logica di ridondanza simmetrica, che sfrutta al meglio le risorse di entrambi.

La logica di gestione della propagazione delle rotture, come abbiamo già visto nella sezione 4.5.4, consiste nella propagazione istantanea dell'evento incidentale. Il guasto viene forzato, in cascata, su tutti gli anelli della catena che seguono, secondo quanto impostato nel foglio delle dipendenze nella cartella del progetto.

### 4.7.3 Modello della fisica del guasto

Attraverso un'indagine di tipo FMECA (*failure modes effects and criticality analysis*) sviluppata in merito alla funzione che il sistema è chiamato ad assolvere, si individuano i componenti critici ed i modi di guasto a cui possono essere soggetti. Queste informazioni sono fondamentali per la generazione della struttura logica del sistema.

Per simulare le singole modalità di rottura puntualizzate dalla FMECA servono, poi, i dati relativi ai ratei di guasto in funzione del tempo e delle particolari condizioni di carico che presumibilmente caratterizzeranno la vita del sistema. Non è semplice reperire questo tipo di informazioni, dal momento che risultano essere fortemente dipendenti dalle particolari situazioni in cui lavorano i componenti e che in generale occorre limitare al minimo le prove sperimentali, per via dei costi. Sono tuttavia disponibili in letteratura delle raccolte di tassi di guasto per i componenti meccanici più

comuni, come possono essere i cuscinetti, in funzione di alcune classi di carico di intensità più o meno gravose. Inoltre è piuttosto diffusa, specialmente presso le grosse aziende, la filosofia di mantenere un archivio storico sui guasti dei propri sistemi, in modo da migliorare la progettazione e l'esercizio dei prodotti futuri (si pensi per esempio alle case automobilistiche). Non è il caso di addentrarsi oltre nell'argomento, in quanto, come da specifica del codice, le distribuzioni di probabilità che descrivono le funzioni di rischio dei componenti vengono considerate note. È però senz'altro utile sottolineare l'incertezza che accompagna le nostre conoscenze sui ratei di guasto, per cui occorre procedere con la massima cautela e sensibilità nell'analisi dei risultati, se si desidera ottenere un buon frutto dalla simulazione.

#### 4.7.4 Estrazione del tempo al guasto — teoria dell'età

Descriviamo, ora, le ipotesi formulate sul fenomeno del guasto e la metodologia numerica implementata nel codice per l'estrazione della variabile casuale *tempo al guasto*. La rottura di un componente viene intesa come l'effetto ultimo di un evento iniziatore (preguasto), che innesca una condizione di funzionamento degradata di durata aleatoria. Le distribuzioni di probabilità che si possono utilizzare per la statistica dei tempi al guasto sono le seguenti:

- *Delta di Dirac*
- *Esponenziale*
- *Weibull*
- *Normale*
- *Lognormale*
- *Gamma*

L'estrazione del tempo a rottura avviene utilizzando la tecnica della trasformata inversa, descritta in appendice B.1. Per ottenere un valore nullo, occorre selezionare la distribuzione *Delta*, con parametro 0. Questo caso è molto diffuso e corrisponde al modo di guasto veloce, che comporta la rottura immediata in seguito al fenomeno di innesco. In caso contrario si ha a disposizione un certo lasso di tempo prima che il componente entri in avaria, per cui si parla di modo di guasto lento. Una perdita di olio lubrificante, o l'insorgere di una vibrazione anomala, ne sono un tipico esempio.

Consideriamo ora come procede la valutazione del tempo di innesco del guasto, focalizzando l'attenzione su un unico componente. Al fine di rendere la simulazione sufficientemente realistica, vengono previste diverse

condizioni di carico applicate al pezzo in esame, durante la vita del sistema. Queste ultime possono essere caratterizzate da più cicli di carico, di durata fissata, che si alternano fra loro all'interno della condizione stessa. Come si vede in figura 4.26, ad ogni singolo ciclo di carico viene poi associato il profilo della funzione hazard, o profilo di rischio, a cui è soggetto il componente.

I cicli di carico individuano periodi, nel corso della simulazione, cui corrispondono sollecitazioni di diversa intensità; a titolo di esempio si considerino i cuscinetti di una macchina operatrice il cui albero ruota a duemila giri al minuto durante il giorno e a seicento giri al minuto durante la notte. In questo caso, si potrebbe effettuare la simulazione approssimando il carico ad una situazione intermedia fra le due sollecitazioni. Lo stesso non si può dire per un aereo, del quale si desideri simulare un certo numero di ore di volo in condizioni turbolente, seguite da ore di volo acrobatico, il tutto intercalato da una certa quantità di atterraggi divisi a loro volta nelle categorie dolce, brusco e 'kamikaze'. Alla luce di questi esempi ci sembra molto utile prevedere una diversificazione dei carichi nel tempo.

Si nota, inoltre, che i singoli profili di rischio possono essere divisi in un numero a piacere di periodi, in ognuno dei quali si può inserire una distribuzione di probabilità per l'innescò del guasto. Questo permette di modellare con precisione l'andamento della funzione hazard prevista per il componente, come si vede per i profili a 'vasca da bagno' di figura.

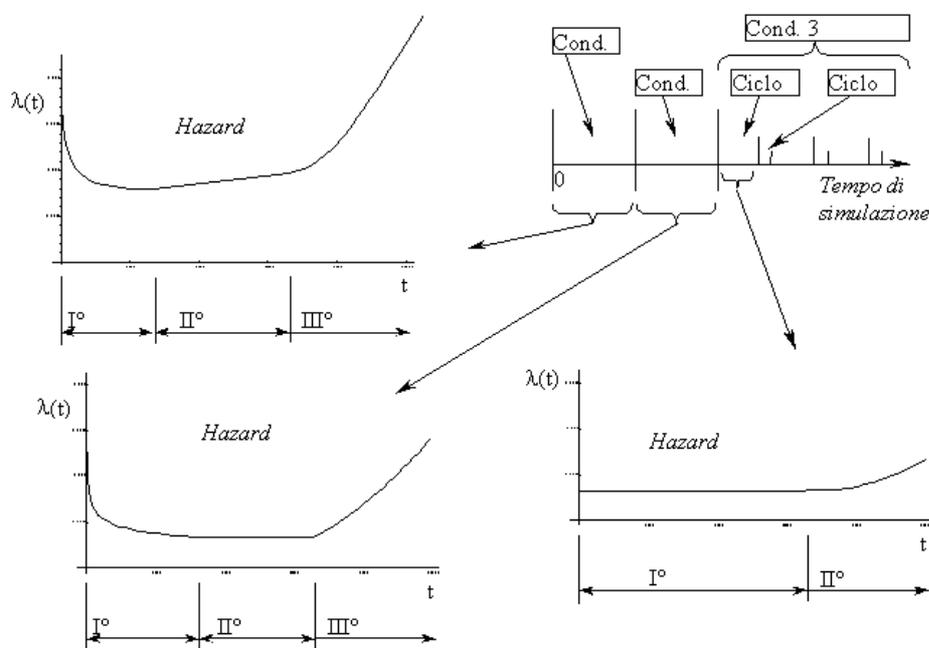


Figura 4.26: Condizioni di carico e cicli di carico con relativi profili di rischio

Prima di procedere alla descrizione della tecnica di estrazione, conviene soffermarsi sul significato di alcune variabili di notevole importanza: il tempo ufficiale della simulazione  $T$ , l'età anagrafica  $\mathcal{T}_{age}$  e l'età fisica  $Age$  del componente.  $T$  rappresenta l'orologio di riferimento e ci permette di individuare la condizione di carico correntemente applicata al pezzo in esame.  $\mathcal{T}_{age}$  misura, invece, il tempo di funzionamento del componente. Viene azzerato all'inizio della simulazione ed in seguito ad ogni evento che prevede la sostituzione del componente stesso. Inoltre, non viene incrementato durante i periodi in cui l'elemento risulta disattivo. Ci fornisce quindi il tempo di effettivo funzionamento, al quale fanno riferimento i profili di rischio.  $Age$  indica l'età accumulata dal componente durante la propria vita.<sup>55</sup>

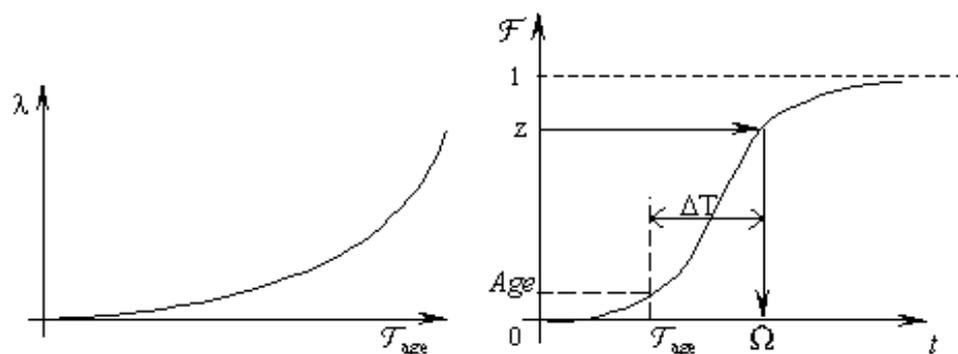


Figura 4.27: Rateo di guasto e probabilità di guasto di un singolo periodo

Consideriamo, per cominciare, il caso più semplice, corrispondente ad un unico periodo per la funzione hazard, come si mostra in figura 4.27. Effettuiamo un'estrazione della variabile  $z$  con distribuzione uniforme utilizzando un generatore di numeri casuali:

$$z \leftarrow \mathcal{U}|_{[0,1[}$$

È necessario, tuttavia, che  $z$  sia uniformemente distribuita nell'intervallo  $[Age, 1[$ , per cui si può ovviare a tale inconveniente applicando a  $z$  la seguente trasformazione:

$$z = Age + z(1 - Age) \quad (4.1)$$

A questo punto occorre calcolare l'intervallo di tempo  $\Delta T$  che intercorre tra il tempo  $T$  e l'istante in cui avverrà l'innesco della rottura. Per fare questo passiamo il valore di  $z$  alla funzione inversa della C.D.F.<sup>56</sup> definita nel nostro unico periodo, ottenendo il tempo  $\Omega$  di funzionamento al quale avviene l'innesco. In ultimo  $\Delta T$  si calcola come segue:

$$\Delta T = \Omega - \mathcal{T}_{age}$$

<sup>55</sup>Per definizione  $Age \in [0, 1]$

<sup>56</sup>Cumulative Density Function.

In figura 4.27 si mostra lo schema del processo appena descritto.

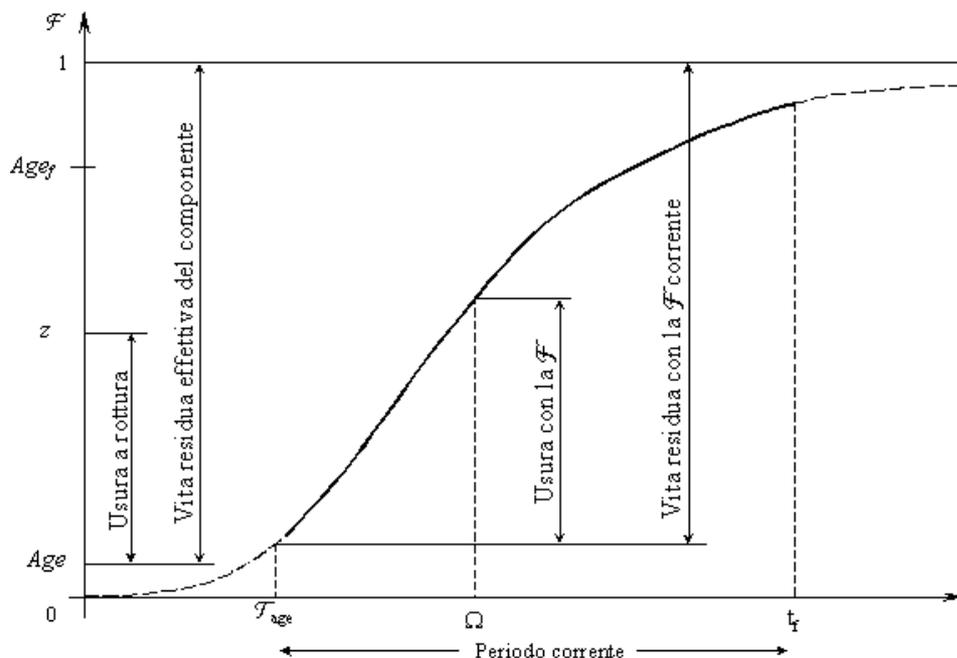


Figura 4.28: Estrazione del tempo al guasto — funzione hazard suddivisa in più periodi

Vediamo ora il caso in cui la funzione hazard viene descritta a tratti con la combinazione di più di una distribuzione di probabilità, facendo riferimento alle notazioni di figura 4.28. Come sopra, viene estratto un valore  $z$  uniformemente distribuito in  $[0, 1[$  e lo si normalizza all'intervallo  $[Age, 1[$  tramite l'equazione 4.1. Si provvede poi a identificare il periodo in cui è compreso  $\mathcal{T}_{age}$  e a valutare l'età  $Age_f$  che si accumulerebbe se il funzionamento fosse protratto fino a  $t_f$ , termine del periodo selezionato. Siano  $\mathcal{F}_i$  ed  $\mathcal{F}_f$  i valori della probabilità di guasto in corrispondenza di  $\mathcal{T}_{age}$  e  $t_f$ . Per calcolare l'età del componente dopo aver vissuto il periodo  $[\mathcal{T}_{age}, t_f]$  possiamo scrivere l'equazione seguente:<sup>57</sup>

$$Age_f = Age + (\mathcal{F}_f - \mathcal{F}_i) \frac{1 - Age}{1 - \mathcal{F}_i} \quad (4.2)$$

Come si può vedere in figura 4.28, il termine  $\zeta = (\mathcal{F}_f - \mathcal{F}_i)/(1 - \mathcal{F}_i)$  rappresenta il rapporto tra la vita che verrebbe consumata durante il funzionamento tra  $\mathcal{T}_{age}$  e la fine del periodo considerato, e la vita residua in  $\mathcal{T}_{age}$ , se il profilo di rischio fosse descritto dalla sola  $\mathcal{F}(t)$ .<sup>58</sup> In pratica il rappor-

<sup>57</sup>Equazione che permette di calcolare quanto si è 'invecchiato' il componente avendo vissuto fino al termine del periodo corrente.

<sup>58</sup>Funzione C.D.F. di guasto relativa al periodo in esame.

to  $\zeta$  indica la percentuale della vita residua effettiva del componente che il periodo corrente è in grado di consumare.

Abbiamo visto come sia possibile utilizzare l'equazione 4.2 per calcolare il valore dell'età del componente al termine di ogni periodo di cui è composto il diagramma del rateo di guasto in funzione del tempo. Si noti, per inciso, che l'età al termine dell'ultimo periodo vale 1,<sup>59</sup> da cui si deduce che esiste ed è unico il periodo fatale  $j$  in cui ricade il valore dell'estrazione  $z$ . All'interno di tale periodo, utilizzando la  $\mathcal{F}(t)$  relativa, è possibile riscrivere l'equazione 4.2 in funzione del tempo a rottura  $\Omega$ :

$$z = Age + (1 - Age) \frac{\mathcal{F}(\Omega) - \mathcal{F}_i}{1 - \mathcal{F}_i} \quad (4.3)$$

che risolta per  $\mathcal{F}(\Omega)$  porta a:

$$\mathcal{F}(\Omega) = \mathcal{F}_i + (z - Age) \frac{1 - \mathcal{F}_i}{1 - Age} \quad (4.4)$$

Richiamando la routine che inverte la funzione  $\mathcal{F}$ , probabilità di guasto del periodo  $j$ , otteniamo  $\Omega$ . A questo punto si valuta il tempo di innesco come segue:

$$T_{innesco} = T + (\Omega - \mathcal{T}_{age})$$

La differenza sostanziale con il caso precedente, in cui il tempo a rottura veniva valutato con un'unica distribuzione di probabilità di guasto, consiste nel fatto che la composizione delle funzioni utilizzate per descrivere il profilo di rischio non è normalizzata. In pratica, per ogni singola funzione densità di probabilità  $k$  vale la seguente condizione di normalizzazione:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_k(x) dx = 1$$

ma questo non implica che sia anche

$$\sum_{k=1}^n \int_{t_k}^{t_{k+1}} f_k(x) dx = 1$$

dove  $n$  indica il numero totale dei periodi e  $[t_k, t_{k+1}]$  gli estremi del periodo  $k$ .<sup>60</sup> È per questo motivo che diventa necessario normalizzare il valore dell'età accumulata con la percentuale di vita residua consumata all'interno del singolo periodo. La procedura descritta viene utilizzata anche per aggiornare il valore dell'età di tutti gli elementi, al fine di tenere conto del funzionamento del sistema nel tempo trascorso fra l'esecuzione di due eventi successivi. In questo caso, se  $\Delta T$  è l'intervallo di funzionamento, si calcola il valore di  $Age_f$  con la tecnica vista sopra, per l'intervallo che va da  $\mathcal{T}_{age}$  a  $\mathcal{T}_{age} + \Delta T$ .

<sup>59</sup>Conseguenza del fatto che l'ultimo periodo si estende a  $+\infty$  e pertanto  $\zeta = 1$ .

<sup>60</sup>In particolare  $t_1 = -\infty$  e  $t_{n+1} = +\infty$ .

## 4.8 Strategie di manutenzione

Osserviamo, per cominciare, che la manutenibilità di un sistema è legata alla facilità con cui possono essere eseguite le riparazioni e può essere quantificata, per esempio, dal tempo medio necessario ad effettuare la riparazione o MTTR (*Mean Time To Repair*). In alcuni casi, invece, si preferisce considerare il MAMT (*Mean Active Maintenance Time*), essendo il tempo impiegato durante la riparazione vera e propria, l'unico parametro che il progettista può influenzare con una certa precisione.

Il tempo necessario per eseguire gli interventi può essere suddiviso in tre gruppi principali:

1. **Tempo di preparazione** — necessario per organizzare la manutenzione, chiamare il personale, recuperare gli attrezzi necessari e la strumentazione per eventuali test ...
2. **Tempo di manutenzione** — impiegato ad effettuare l'intervento vero e proprio.
3. **Tempi morti** — ritardi dovuti a problemi di logistica, quali l'attesa di pezzi di ricambio.

Il codice RAMSES permette di inserire le distribuzioni di probabilità che descrivono i primi due punti, più una terza relativa al tempo necessario per effettuare le verifiche sul buon esito della riparazione, non appena questa viene ultimata. Il terzo punto, invece, viene automaticamente messo in conto durante l'elaborazione. Il codice, infatti, provvede a sospendere la manutenzione, inserendo i dati relativi nella 'lista di attesa', nel caso in cui venissero a mancare i pezzi di ricambio o la manodopera. La fase di preparazione può comprendere anche il tempo necessario a studiare schemi e disegni del sistema, mentre la fase in cui vengono effettuati i test può tenere in considerazione il tempo utilizzato a redigere rapporti e a presentare opportune documentazioni, quando ciò è richiesto da norme cogenti, come è il caso per le manutenzioni dei velivoli.

Il codice RAMSES è in grado di gestire per i sistemi riparabili la generalità dei casi di manutenzione correttiva e proattiva. Nel primo caso non si pianifica il tempo di intervento e il numero totale di riparazioni dipende dall'affidabilità del sistema. Nel secondo caso, al contrario, l'obiettivo consiste nel conservare il sistema nel suo stato di funzionamento, attraverso la prevenzione dei guasti ed il 'condition monitoring'. Gli interventi di manutenzione preventiva comprendono anche le operazioni di pulizia e di lubrificazione, mentre le ispezioni periodiche vengono programmate al fine di rilevare le rotture incipienti, per esempio attraverso il riconoscimento di difetti strutturali di dimensioni pericolose.

È importante notare che esiste una reciproca interazione fra l'affidabilità e la manutenibilità e che entrambe influiscono in modo determinante sulla disponibilità del sistema e sui costi di esercizio. In particolare, nel caso in cui sia i guasti che le manutenzioni avvengano a tasso costante, si ottiene per lo stato stazionario il seguente valore della disponibilità:

$$\mathcal{D}(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MPMT}$$

dove per MPMT si intende il *Mean Preventive Maintenance Time*.

L'esperienza insegna che i tempi necessari ad effettuare le manutenzioni tendono ad essere distribuiti secondo una Lognormale. In pratica, infatti, anche se abbiamo dei casi in cui la riparazione viene portata a termine velocemente, è decisamente improbabile che il tempo richiesto risulti molto inferiore ai tempi previsti dalle procedure, mentre è assai più probabile che insorgano problemi di varia natura che portino a protrarre il tempo di intervento oltre il previsto.

L'obiettivo principe della manutenzione proattiva è quello di massimizzare i benefici effetti che si possono ottenere sulla disponibilità, sui costi di esercizio e sulla sicurezza del sistema considerato, con il minimo spreco di risorse possibile. A tal fine, come è ovvio, occorre pianificare gli interventi in modo ottimale, senza incorrere nell'errore di effettuare delle manutenzioni quando non servono. Come si mostra in figura 4.29, se un pezzo fosse caratterizzato da un rateo di guasto decrescente nel tempo, qualsiasi intervento ne aumenterebbe la probabilità di rottura. Ancora, se il rateo di guasto fosse costante nel tempo, le riparazioni non sortirebbero alcun effetto sul valore dell'affidabilità, provocando soltanto una fastidiosa impennata dei costi di esercizio. Una situazione molto interessante, invece, si verifica quando il componente è dotato di un periodo all'inizio della vita senza guasti.<sup>61</sup> In questo caso, la sostituzione preventiva del pezzo garantirebbe la totale assenza di eventi di guasto.

Le considerazioni di cui sopra sono vere nell'ipotesi che le riparazioni non introducano difetti o cause aggiuntive di danno, che altrimenti potrebbero alterare la densità di probabilità di guasto del componente considerato. Bisogna quindi esaminare attentamente le procedure di manutenzione, per individuare possibili punti critici e abbassare la probabilità di effettuare interventi dannosi.<sup>62</sup> Il codice RAMSES, al momento presente, utilizza l'ipotesi di base che le riparazioni non alterino il profilo di rischio degli elementi del

---

<sup>61</sup>In gergo si parla di *failure free life*.

<sup>62</sup>J. Moubray avverte che nel settore aeronautico l'89% dei componenti presenta nell'arco della propria vita utile un andamento del rateo di guasto prima decrescente e poi costante. Per questi casi qualsiasi intervento di manutenzione potrebbe rivelarsi estremamente inefficace, se non dannoso.

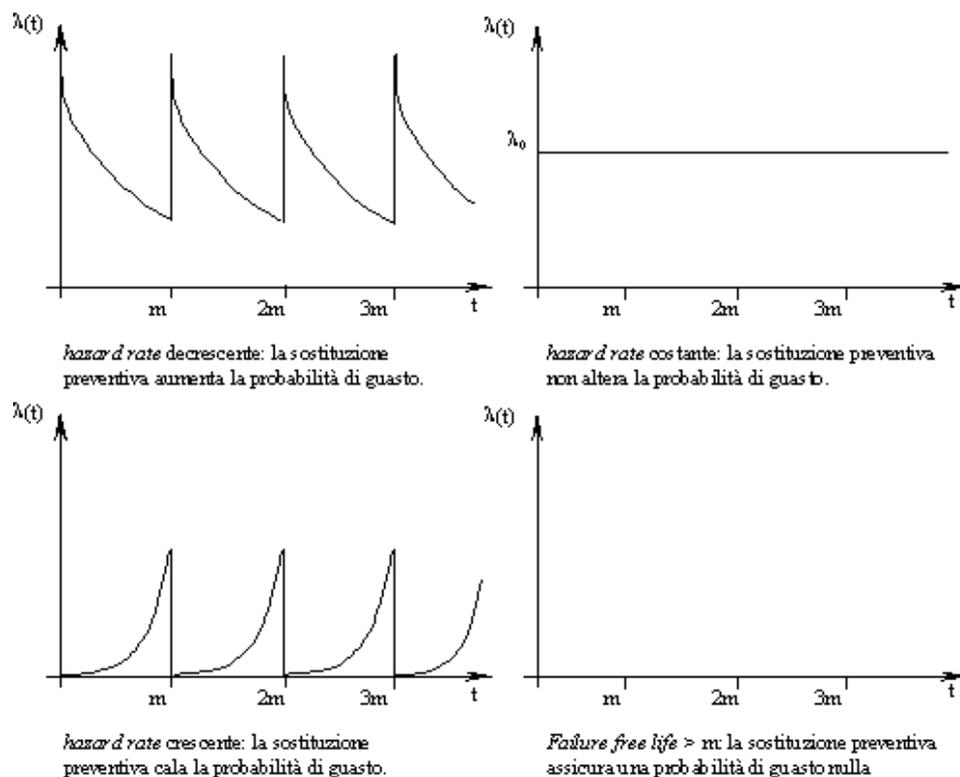


Figura 4.29: Interventi di manutenzione per diversi andamenti del rateo di guasto nel tempo

sistema sui quali vengono effettuate.<sup>63</sup> Bisogna inoltre tenere in considerazione gli effetti delle varie modalità di guasto, in quanto si possono avere condizioni più critiche di altre che necessitano di interventi più frequenti ed accurati.

Per ottimizzare il piano di manutenzione proattiva occorre analizzare in dettaglio le seguenti voci, per ogni singolo componente:

1. La distribuzione di probabilità del tempo a rottura per i principali modi di guasto.
2. Gli effetti dei singoli guasti in termini di danno economico e di danno alle persone.
3. Il costo delle sostituzioni programmate.
4. I probabili effetti della manutenzione sui parametri di interesse (disponibilità del sistema, costo di esercizio, profilo di rischio).

<sup>63</sup>Sono previsti sviluppi futuri che prevedano anche questa possibilità.

Questa procedura si rivela di indubbia utilità per quanto riguarda i pezzi che non forniscono alcuna indicazione sull'innescò del guasto. Per i componenti sui quali risulta possibile rilevare le rotture incipienti, per esempio attraverso ispezioni, test non distruttivi o segnali di allarmi, occorre tenere in considerazione anche i seguenti punti aggiuntivi:

1. Il tasso di propagazione del difetto prima che si raggiunga la soglia oltre la quale avviene la rottura.<sup>64</sup>
2. Il costo delle singole ispezioni o test.

Si noti che dal secondo punto in poi un'analisi di tipo FMECA (*Failure Modes Effects and Criticality Analysis*) diventa uno strumento essenziale per la pianificazione della manutenzione. Un approccio sistematico di questo tipo, in cui la manutenzione viene organizzata tenendo in considerazione gli aspetti affidabilistici, rientra nella filosofia della RCM (cfr. al capitolo 2).

Il codice RAMSES è programmato per eseguire gli interventi di riparazione e le ispezioni periodiche secondo le scadenze inserite attraverso le interfacce dati descritte nella sezione 4.5.6. In tal modo è possibile simulare gli effetti delle diverse politiche di manutenzione che possono essere adottate sul sistema. In particolare, la manutenzione può essere organizzata ai due livelli gerarchici di componente e di sottosistema. Nel primo caso il pezzo viene riparato se non si è ancora superato il numero massimo di interventi ammissibile specificato in ingresso, altrimenti si provvede alla sostituzione con un componente nuovo preso dal magazzino. Per i sottosistemi, invece, è possibile procedere alla sostituzione in blocco, nel caso in cui venga rilevato il malfunzionamento globale dell'unità.

Il modo più semplice di organizzare la manutenzione consiste nell'attendere il verificarsi della rottura, prima di prendere qualsiasi provvedimento. Una simile filosofia, che prende il nome di manutenzione correttiva, può risultare non soddisfacente, per esempio in termini della disponibilità che si desidera ottenere dal sistema in un particolare periodo della sua vita. È senz'altro interessante, quindi, simulare gli effetti della manutenzione preventiva, valutando da un lato, il beneficio che si riesce ad ottenere sulla disponibilità del sistema e dall'altro, l'incidenza del piano di interventi programmati sui costi totali di esercizio.

Un'altra particolare forma di intervento, che risulta essere di indubbia utilità, è la manutenzione condizionata alle condizioni di preguasto. In questo caso la logica adottata, che ha un senso solo per i modi di guasto lenti, prevede l'organizzazione della manutenzione non appena viene rilevato l'innescò della rottura.

---

<sup>64</sup>Curve di predizione  $\mathcal{P} \mapsto \mathcal{F}$ .

I guasti, sia di tipo lento che veloce, possono essere riconosciuti attraverso la rilevazione immediata, oppure utilizzando degli opportuni segnali di allarmi, o, ancora, avvalendosi di ispezioni periodiche. Nel secondo caso sono previsti dei componenti che simulano il sistema di allarme, sui quali viene effettuata la verifica di corretto funzionamento prima di attivare la procedura che organizza la manutenzione. Nel terzo caso, invece, viene richiesto all'utente il piano delle ispezioni periodiche, per i soli elementi del sistema che lo richiedono. In corrispondenza delle singole ispezioni, poi, si controlla lo stato dei componenti specificati e si organizza la manutenzione nel caso fossero trovati in avaria. Come esempio si può pensare alle ispezioni periodiche che vengono effettuate sulle fusoliere degli aerei, per controllare l'eventuale presenza di cricche e procedere agli opportuni interventi correttivi.

Come caratteristica peculiare del codice, come si è già visto, è inoltre possibile tenere nota del livello dei pezzi in magazzino utilizzati per le manutenzioni e della disponibilità della manodopera che effettua le riparazioni e le ispezioni. I pezzi di ricambio ed il personale di officina costituiscono le risorse di base di tutte le procedure che gestiscono le varie fasi della manutenzione, per cui, in caso di penuria rispetto alle richieste, queste ultime vengono sospese in un'apposita lista di attesa. Può infatti accadere di dovere attendere l'arrivo in magazzino dei pezzi riordinati, oppure che si liberi parte della manodopera impegnata in altre riparazioni.

## 4.9 Limiti della simulazione numerica applicata alla manutenzione

Occorre non perdere di vista che le incertezze di base che gravano sui dati di guasto grezzi si sommano per le catene di eventi legati fra loro da relazioni di causa – effetto (guasti - riparazioni - guasti successivi ...), per cui l'errore statistico insito nel metodo Monte Carlo aumenta con l'allungarsi delle catene stesse durante il corso della simulazione.

Sarebbe opportuno, quindi, limitare la durata della missione simulata a non più di uno o due ordini di grandezza rispetto alla minima costante di tempo scelta fra le massime costanti di tempo relative ad ogni singola catena di eventi del sistema.<sup>65</sup> Per costante di tempo si intendono, per esempio, le stime dei tempi medi al guasto dei componenti (MTBF) e dei tempi medi di manutenzione (MTTR).

---

<sup>65</sup>All'interno di una sequenza di eventi correlati fra loro ad anello, infatti, il numero complessivo di eventi è legato al tempo massimo che intercorre fra uno di questi ed il successivo. Analizzando il sistema nel suo complesso, invece, il numero massimo di eventi è relativo alla catena che si sviluppa più rapidamente e cioè governata dalla più piccola costante di tempo.

## Capitolo 5

# Applicazioni della simulazione di manutenzione

Presentiamo in questo capitolo due applicazioni di ottimizzazione del piano di manutenzione programmata realizzate con il codice di simulazione RAMSES.

### 5.1 Sistema di attuatori di potenza

Questa applicazione riguarda il circuito oleodinamico rappresentato in figura 5.1, che controlla l'attivazione sequenziale di due serie di attuatori lineari. Definiamo subito la missione del sistema, o requisito funzionale desiderato dagli utilizzatori: 'Il sistema deve essere in grado di cominciare ed ultimare ogni singolo ciclo di lavoro in sicurezza'. Si osservi, quindi, che in questo caso la funzione primaria del sistema non è la produttività, bensì la corretta esecuzione del ciclo di lavoro. Il requisito di ultimare il ciclo in sicurezza indica anche la necessità di implementare a livello di progettazione e gestire a livello manutentivo eventuali situazioni di 'recovery' del sistema a seguito del guasto.

#### 5.1.1 Analisi funzionale dell'impianto

Il sistema, molto compatto, è costituito dai componenti che seguono:

- Unità di pompaggio (centralina oleodinamica)
- Accumulatore idraulico
- Filtro

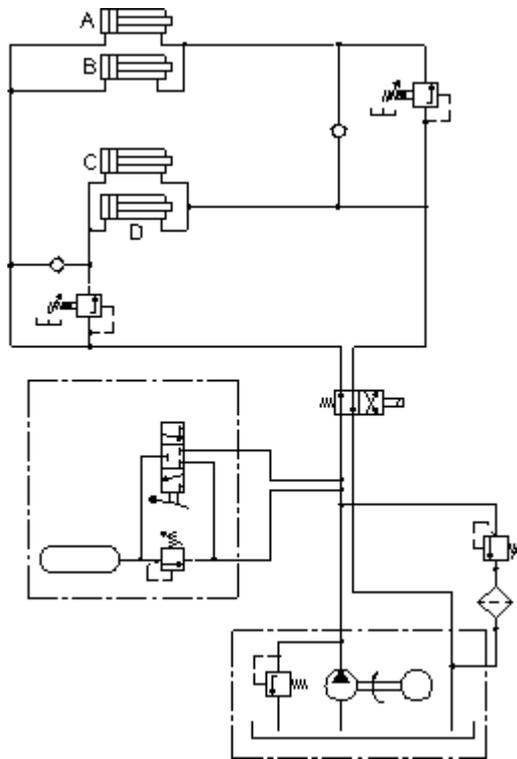


Figura 5.1: Impianto oleodinamico

- Elettrovalvola per controllo sequenza operativa
- Valvola di sfogo delle sovrappressioni
- Elettrovalvola distributrice 4/2
- Valvola unidirezionale
- Attuatore lineare a doppio effetto
- Fluido (olio del circuito)
- Condotte di collegamento dei componenti

Gli attuatori  $A$  e  $B$  sono da considerarsi come unità ridondanti, così come gli attuatori  $C$  e  $D$ . In tal senso, il ciclo completo di lavoro può essere descritto dalla seguente sequenza:

$$(A + B) \nearrow (C + D) \nearrow | (C + D) \searrow (A + B) \searrow$$

o in alternativa, considerando il parallelo di attuatori  $A$  e  $B$  come un'unica unità funzionale  $K$ , e analogamente gli attuatori  $C$  e  $D$  come una seconda

unità  $G$ :

$$K \nearrow G \nearrow \mid G \searrow K \searrow$$

Possiamo inoltre riunire i singoli gruppi funzionali in 4 unità logiche elementari:

1. unità di alimentazione
2. unità di distribuzione
3. fluido
4. unità esecutiva

Si noti che l'olio del circuito viene considerato come un'unità a parte, per la sua particolare importanza agli effetti della manutenzione. Consideriamo in dettaglio le singole unità funzionali.

### **Alimentazione**

Il blocco di alimentazione è composto da 2 elementi che dal punto di vista dell'affidabilità funzionano in parallelo. Questo perchè, ricordando la missione richiesta, in caso di guasto del componente di pompaggio principale (la centralina oleodinamica), si avrebbe comunque a disposizione una riserva di pressione idraulica di emergenza fornita dall'accumulatore.<sup>1</sup> In caso di guasto del gruppo di pompaggio, il sistema risulta quindi in grado di portarsi alla configurazione di riposo, condizione essenziale per l'esecuzione in sicurezza degli interventi di manutenzione.

I componenti dell'unità di alimentazione sono quindi 2, e precisamente:

1. Centralina oleodinamica
2. Accumulatore idraulico

### **Distribuzione**

Questa unità funzionale è costituita dagli elementi che collegano il sistema di alimentazione agli attuatori e che ne condizionano la sequenza operativa. In particolare tutti i componenti risultano essere fondamentali per una distribuzione corretta e funzionale, per cui, dal punto di vista logico, saranno disposti in serie.

---

<sup>1</sup>L'accumulatore deve quindi essere dimensionato per fornire la prevalenza necessaria a garantire un ciclo di lavoro del sistema.

1. Filtro
2. Elettrovalvola distributrice 4/2
3. N 2 Valvole sequenziatrici
4. Valvola di sfogo
5. N 2 Valvole unidirezionali
6. Condotte di collegamento tra i componenti

### **Fluido del circuito oleodinamico**

Il fluido viene considerato singolarmente, essendo oggetto di uno studio specifico mirato a valutarne le influenze sul degrado del sistema. Tale esigenza è emersa dal confronto con tecnici del settore che grazie alla loro provata esperienza hanno suggerito di trattarlo come elemento di primaria importanza.

In particolare il fluido è soggetto ad un fenomeno di usura precoce, dovuto alle condizioni di utilizzo, che ne alterano gradatamente le proprietà fisiche e chimiche, rendendolo anche veicolo di polveri ed impurità di vario genere. Una rapida usura del fluido può compromettere il regolare funzionamento di tutti i componenti del sistema, a causa della progressiva e dannosa contaminazione. In tal senso lo stato di degrado del fluido agisce come modo di guasto che si può propagare al resto del sistema. In effetti l'esperienza insegna che il fluido ha una incidenza decisamente elevata sulle cause di guasto di tutti i componenti, influenza che dovrà essere tenuta adeguatamente in considerazione nel modello di simulazione.<sup>2</sup>

### **Gruppo di attuatori di potenza**

Questa unità comprende 2 coppie di attuatori lineari a doppio effetto. La ridondanza attiva che sussiste tra i componenti di ogni singola coppia induce un aumento dell'affidabilità e della sicurezza complessiva del sistema. Componenti: 4 attuatori lineari a doppio effetto.

#### **5.1.2 Diagramma a blocchi di affidabilità**

A seguito dell'analisi funzionale del sistema è possibile disegnare il diagramma a blocchi di affidabilità di figura 5.2.

---

<sup>2</sup>Si pensi all'importanza di una frequente sostituzione dell'olio lubrificante dei motori.

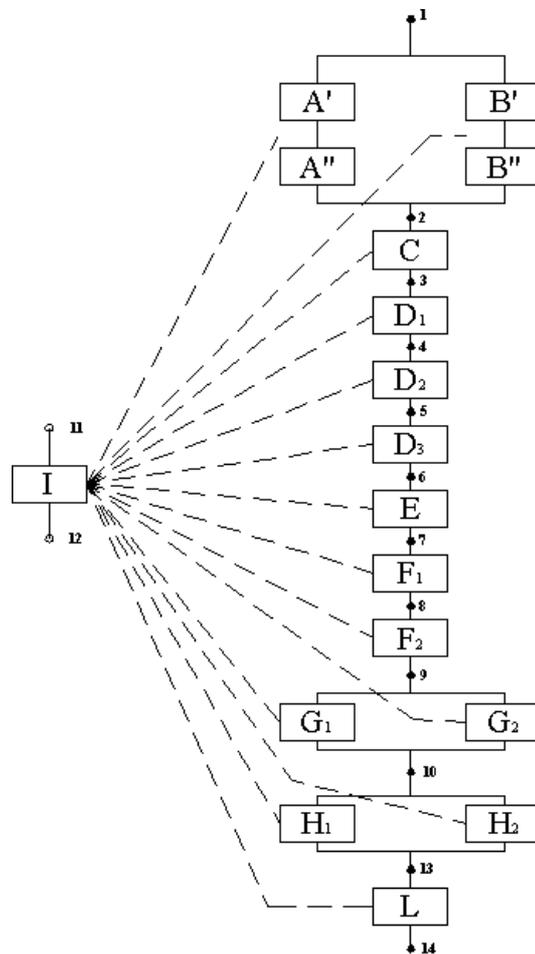


Figura 5.2: Diagramma a blocchi di affidabilità dell'impianto

Come abbiamo già avuto modo di osservare, l'unità di alimentazione di fluido in pressione è costituita dal parallelo dei due componenti  $A$  e  $B$ , che rappresentano la centralina oleodinamica e l'accumulatore idraulico. Si osservi, inoltre, che per tali componenti sono previsti 2 modi di guasto, a differenza di quanto accade per il resto del sistema. Eccezione fatta per il gruppo di attuatori, che ancora una volta viene modellato con una logica di ridondanza attiva, si effettuano i collegamenti con gli altri componenti in serie.

Discorso a parte, invece, è riservato al fluido oleodinamico (olio). Il fluido è soggetto ad un rapido degrado delle proprie caratteristiche nel tempo e come abbiamo visto, può innescare delle situazioni di preguasto negli altri componenti. Per questo motivo l'olio, rappresentato con la sigla  $I$ , non entra direttamente nel diagramma, ma influenza l'affidabilità del sistema

interagendo tramite propagazione del guasto sui componenti attivi.

Per ogni componente, deve quindi essere attivato un ulteriore modo di guasto, di tipo passivo,<sup>3</sup> che può essere innescato solo dal fluido. La simulazione di una logica siffatta risulta interessante per la possibilità di valutare a priori la politica di manutenzione più efficiente in termini di costi, e al contempo più efficace negli interventi programmati. Questi ultimi, infatti, devono essere eseguiti con la giusta tempistica, al fine di ripristinare i componenti attivi del sistema dalle condizioni degradate indotte dal fluido, prima che abbiano a guastarsi.

### 5.1.3 Fisica del guasto dei componenti

Uno dei problemi di maggior rilievo, al fine di effettuare una simulazione sufficientemente realistica, consiste nella giusta individuazione dei modi di guasto ed in una corretta assunzione dei ratei di guasto dei singoli componenti.

Purtroppo anche nel campo dell'oleodinamica, così come è disservizio comune dei sistemi di manutenzione, non sussiste una consolidata pratica di raccolta e catalogazione dei dati di guasto storici. Non solo, ma come è comprensibile, le poche aziende che dispongono e si sono create negli anni un archivio storico di affidabilità dei loro componenti, lo conservano con la dovuta gelosia, per non perdere il vantaggio competitivo acquisito rispetto alla concorrenza.

Per le nostre esigenze particolari, si è ritenuto opportuno sfruttare i dati di guasto disponibili sul manuale del RAC, il NEPRD 95, opportunamente corretti facendo ricorso al giudizio degli esperti.<sup>4</sup>

Si è quindi deciso di adottare la distribuzione di probabilità di guasto di Weibull per modellare il fenomeno di usura dei componenti e di mantenere la distribuzione di probabilità esponenziale in tutti i casi in cui non si dispongono di ulteriori informazioni. In particolare, per il caso delle Weibull, si è deciso di stimare a priori il valore del parametro di forma  $\beta$ , e di ricavare il parametro di scala  $\vartheta$  dalla relazione seguente:

$$\mathcal{R}_{exp}(MTBF) = \mathcal{R}_{Weib}(MTBF)$$

---

<sup>3</sup>In gergo 'dormant'.

<sup>4</sup>In particolare l'archivio NEPRD fornisce valori  $\lambda$  di rateo di guasto costanti nel tempo, da cui si ricava il tempo medio fra i guasti:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

che in forma esplicita diventa

$$e^{-\lambda \times MTBF} = e^{-\left(\frac{MTBF}{\vartheta}\right)^\beta}$$

ed in ultima analisi

$$1 = \left(\frac{MTBF}{\vartheta}\right)^\beta \implies \underline{\vartheta = MTBF}$$

Come abbiamo già visto nella sezione 5.1.2, relativa al diagramma a blocchi di affidabilità del sistema, sono stati individuati due modi di guasto per la centralina oleodinamica e per l'accumulatore, mentre per gli altri componenti è stato considerato un modo di guasto solo.

Componente	modo di guasto	vita sicura [h]	MTBF [h]	$\beta$	$\vartheta$ [h]
Pompa	1. Weibull			3.5	87600
	2. Weibull			1.7	175200
	3. $\delta$ Dirac	720			
Accumulatore	1. Weibull			1.5	99400
	2. Esponenziale		$9.8 \times 10^6$		
	3. $\delta$ Dirac	2800			
Filtro	1. Esponenziale		$10^5$		
	2. $\delta$ Dirac	720			
Circuito	1. Esponenziale		$10^5$		
	2. $\delta$ Dirac	2800			
Elettrovalvole seq. / sfogo	1. Weibull			2	$980 \times 10^3$
	2. $\delta$ Dirac	1400			
Elettrovalvola distributrice	1. Weibull			2.5	$450 \times 10^3$
	2. $\delta$ Dirac	720			
Valvola unidirezionale	1. Weibull			1.5	$190 \times 10^3$
	2. $\delta$ Dirac	2800			
Attuatori lineari	1. Weibull			4	$98 \times 10^3$
	2. $\delta$ Dirac	720			
Fluidi	1. Weibull			3	87600

Tabella 5.1: Parametri di guasto per la simulazione del sistema

Per tutti i componenti, inoltre, viene inserito un modo di guasto di tipo *dormant*,<sup>5</sup> che viene innescato dal deterioramento del fluido. In particolare si è deciso di adottare una distribuzione del tempo al guasto di tipo

<sup>5</sup>Condizione di funzionamento degradata, o di preguasto (cfr. alla sez. 2.4.3)

deterministico,<sup>6</sup> simulando in tal modo l'innesco di una 'bomba ad orologeria' sul componente. Presentiamo nella tabella 5.1 i parametri di guasto utilizzati.

#### 5.1.4 Grafico di affidabilità

Con i dati elaborati fino a questo punto, possiamo momentaneamente trascurare la politica di manutenzione, lanciando una simulazione della vita del sistema isolato. In tal senso, durante la simulazione, non viene resa disponibile alcuna risorsa manutentiva, cosa che permette di ottenere l'andamento dell'affidabilità nel tempo, come si mostra in figura 5.3.

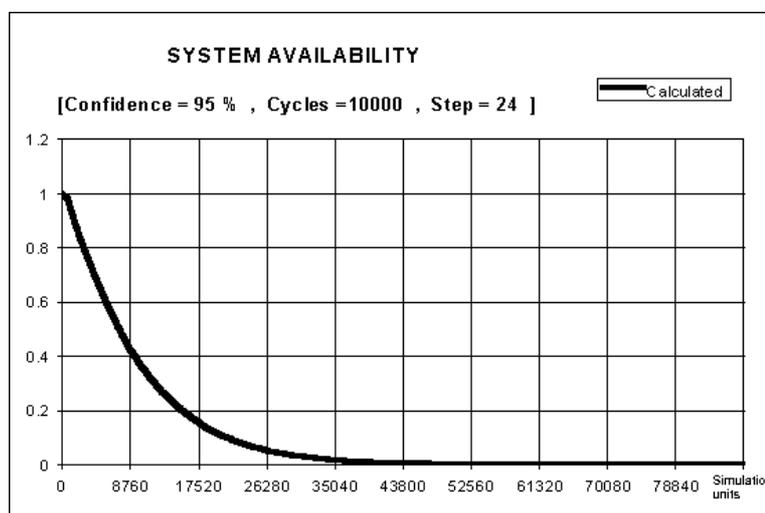


Figura 5.3: Profilo di affidabilità del sistema

#### 5.1.5 Il problema della contaminazione

Così come è stato fatto per il sistema, possiamo studiare l'affidabilità dei singoli componenti in funzione del tempo, ed ordinare i risultati in un diagramma di Pareto del tipo rappresentato in figura 5.4.

Osservando il diagramma, si nota immediatamente che il fluido risulta essere il componente più problematico, in quanto le sue condizioni si degradano più rapidamente rispetto a quelle degli altri componenti del sistema. Considerato anche la particolare criticità legata ai problemi di contamina-

<sup>6</sup>Cioè una delta di Dirac.

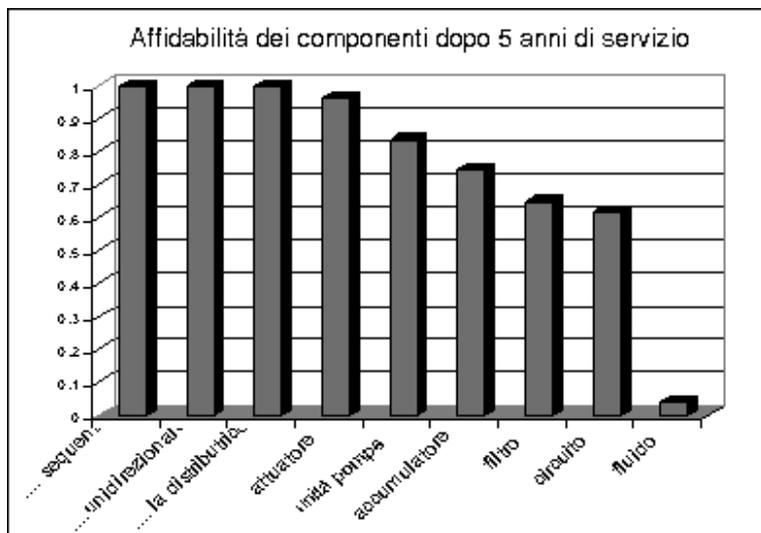


Figura 5.4: Pareto delle affidabilità dei componenti

zione, diventa essenziale cercare di stabilire la *Reliability importance*<sup>7</sup> del componente.

A tal fine possiamo cercare di isolare gli effetti del comportamento del fluido, lanciando due simulazioni della disponibilità del sistema con strategie di manutenzione differenti. In particolare siamo interessati a confrontare la disponibilità del sistema fra il caso in cui la manutenzione viene effettuata solo sui modi di guasto del fluido e sulle condizioni di preguasto da esso indotte, ed il caso in cui vengano eseguite riparazioni dei soli modi di guasto indipendenti dal fluido.<sup>8</sup>

In particolare viene simulata la manutenzione correttiva istantanea dei modi di guasto di interesse, con rilevazione immediata del malfunzionamento e tempo totale di intervento nullo.<sup>9</sup> In queste condizioni otteniamo l'andamento limite teorico della disponibilità durante l'esercizio della missione, che mostriamo in figura 5.5.

Come era prevedibile, si nota una notevole influenza del fluido sul comportamento globale del sistema, se paragonato al caso della manutenzione sulle sole altre unità funzionali, che non induce un miglioramento sensibile rispetto alla simulazione di affidabilità. Secondo le linee guida della

<sup>7</sup>La *RI* fornisce una misura dell'influenza del componente nei riguardi dell'affidabilità complessiva del sistema.

<sup>8</sup>Confrontando tali andamenti di disponibilità con il grafico di affidabilità del sistema, possiamo farci un'idea della *Reliability Importance*, rispettivamente, del fluido e dell'assieme del resto dei componenti.

<sup>9</sup>La riparazione è istantanea.

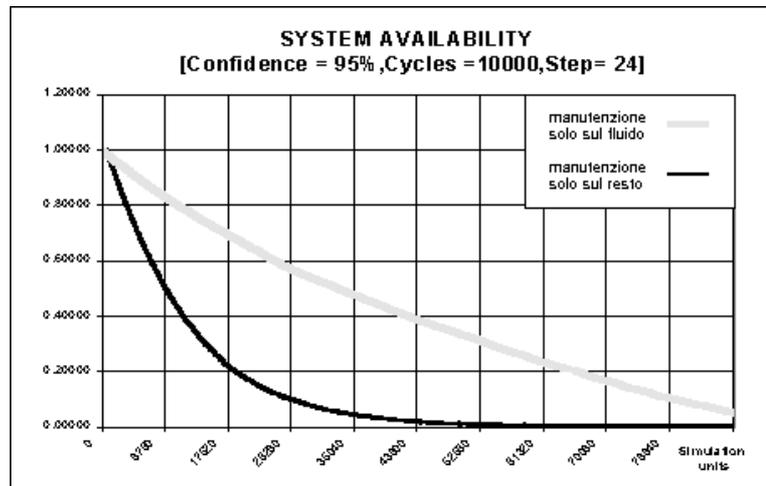


Figura 5.5: Disponibilità limite teorica con manutenzine sul fluido vs altri componenti

RCM, per le quali si rimanda alla sez. 2.3, affinché il sistema continui a svolgere la funzione richiesta dall'utilizzatore, occorre quindi indirizzare il massimo dell'attenzione manutentiva sulla conservazione delle caratteristiche fisico chimiche dell'olio, e sul filtraggio, in modo da garantirne l'integrità nel tempo.

A conclusione di questa sezione, mostriamo l'andamento della disponibilità del sistema, sempre nel caso di interventi programmati solo sul fluido oleodinamico, quando la politica di manutenzione simulata si avvicina di più alle reali condizioni di esercizio.

In particolare non è possibile rendersi conto dello stato di degrado dell'olio, se non attraverso l'esecuzione di opportune ispezioni ed analisi. Pertanto il piano di manutenzione simulato prevede un intervento preventivo di sostituzione completa del fluido con frequenza annuale, ed un piano di ispezioni programmate, con frequenza costante e pari a sei mesi.

Si noti che il risultato di figura 5.6 si mantiene al di sotto della curva limite teorica di disponibilità, che viene raggiunta solo a seguito degli interventi di manutenzione preventiva.<sup>10</sup>

<sup>10</sup>Perchè in questo caso la frequenza di sostituzione viene inserita come parametro deterministico, e per conseguenza tutte le  $n$  storie della simulazione Monte Carlo eseguono la rigenerazione dei modi di guasto legati al fluido nello stesso istante.

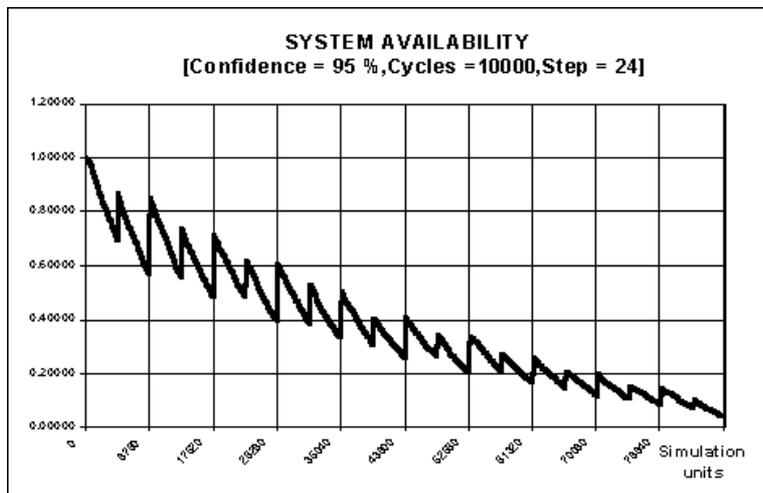


Figura 5.6: Disponibilità pratica con ispezioni e sostituzioni sul fluido

### 5.1.6 Simulazione di risorse scarse e dei costi di esercizio

Supponiamo, ora, che il sistema considerato debba operare in condizioni di semi isolamento, che comportano tempi di consegna dei pezzi di ricambio molto elevati. In tali condizioni, la simulazione numerica permette di considerare le risorse scarse evidenziandone la priorità relativa.

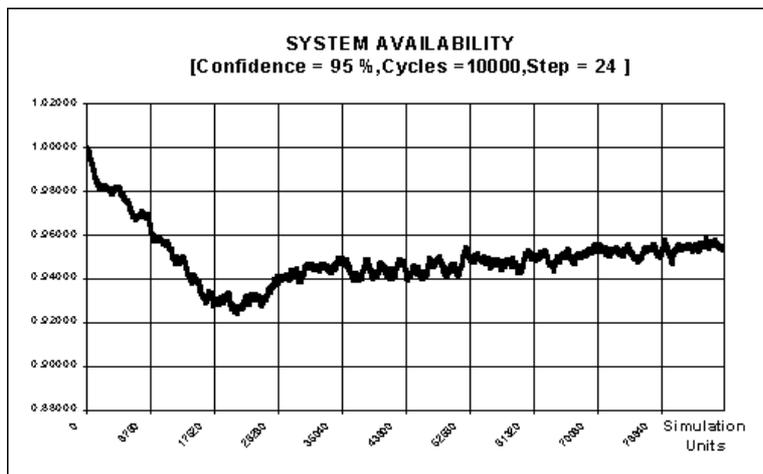


Figura 5.7: Disponibilità del sistema semi isolato

Per fare un esempio, consideriamo il caso, del tutto realistico, in cui pochi componenti di elevatissima affidabilità, siano talmente costosi da non

permettere di tenere sempre e a pronta disposizione i ricambi in magazzino. L'elevata affidabilità, infatti porterebbe a tempi di giacenza lunghissimi, con impegni finanziari forse insostenibili e con il rischio, anzi con la certezza di una rapida obsolescenza del componente in attesa nel magazzino. D'altro canto tali componenti, per loro tipica natura, sono generalmente essenziali ai fini della produttività, in quanto, ancora una volta, gli elevati costi non giustificano la ridondanza di installazione. Questa considerazione, unitamente ai lunghi tempi di consegna, perchè tali componenti sono raramente prodotti in serie, ma devono essere progettati e costruiti su commessa, indica, invece, la necessità di avere i ricambi a pronta disposizione.

Una corretta programmazione della manutenzione deve orientarsi verso il giusto compromesso fra queste esigenze contrastanti, entrambe delicate e di fondamentale importanza. A tal fine, il processo decisionale deve essere assistito da valutazioni oggettive degli indici di merito delle politiche di manutenzione possibili, che possono essere fornite solo da una adeguata simulazione numerica.

Per fare un esempio pratico di simulazione di un sistema con risorse scarse, possiamo considerare il caso presentato in questa sezione, supponendo, per esempio, che i componenti critici siano le elettrovalvole della distribuzione. Lanciamo allora il codice Monte Carlo, nell'ipotesi che non sia possibile mantenere alcuna scorta del suddetto tipo di elettrovalvola, e che in caso di guasto i tempi logistici di attesa siano stimabili in 1000 ore. Per quanto riguarda il resto dei componenti, fluido compreso, supponiamo invece di disporre di pezzi di ricambio e squadra di manutenzione tali da poter effettuare le riparazioni in tempi ragionevoli.

Alla luce delle condizioni di esercizio imposte si ottiene il diagramma di disponibilità di figura 5.7, dove si osserva che nel lungo periodo il valore medio di indisponibilità si assesta sul 5% circa.

Il passo successivo consiste nel valutare i costi di esercizio dovuti a tale valore di indisponibilità, supponendo una perdita oraria di 25 euro, valutando la possibilità di introdurre vantaggiosamente un piano di manutenzione programmata con sostituzione dell'elettrovalvola critica a frequenze di 3 anni e 4 mesi, sostenendo il costo di 7000 euro.

Come si mostra in figura 5.8, possiamo sovrapporre i rispettivi andamenti del costo di esercizio nel tempo, espressi in migliaia di euro, per effettuare una valutazione comparativa delle due politiche di manutenzione. In questo modo è possibile verificare la sussistenza di differenze significative sul lungo periodo e tali da giustificare la scelta di un tipo di intervento piuttosto che un altro.

Osserviamo, per concludere, che non esiste una tipologia di manutenzione particolarmente conveniente, a priori, e che durante la programmazione

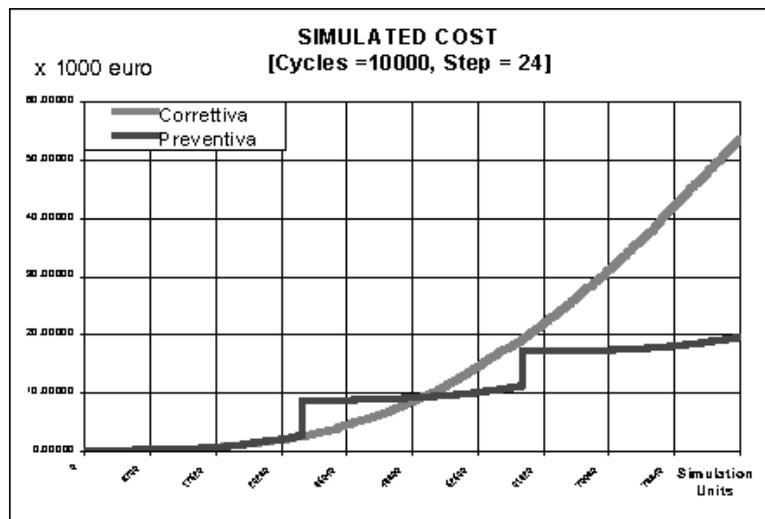


Figura 5.8: Valutazione comparativa della convenienza economica

degli interventi, oltre a tenere in buona considerazione l'aspetto economico, non si devono assolutamente trascurare gli effetti sulla disponibilità e sulla sicurezza del sistema.

## 5.2 Ottimizzazione di un piano di manutenzione automobilistico

In questa sezione si presenta un ulteriore esempio di come la simulazione numerica della manutenzione possa fornire ottime indicazioni sulle strategie da adottare per migliorare la disponibilità dei sistemi, ottimizzando la gestione delle risorse e quindi anche il costo di esercizio.

Si prenda dunque in considerazione la scheda di manutenzione programmata di un autoveicolo per uso privato, con motore diesel. In particolare, la casa costruttrice specifica il piano di interventi preventivi e di ispezioni periodiche per i primi 180000 km di servizio della vettura, secondo lo schema indicato nella tabella 5.2.

Da una rapida analisi delle frequenze chilometriche in programma per gli interventi, si evince che un grosso margine di ottimizzazione potrebbe risiedere nella revisione critica del piano di sostituzione dell'olio motore. La frequenza così elevata di sostituzione, infatti, potrebbe non essere strettamente necessaria dal punto di vista dell'affidabilità, ed è sicuramente motivo di disagio per il cliente, che in generale è costretto a ricorrere all'assistenza tecnica di un'officina, perdendo tempo e denaro.

<b>Tipo di intervento</b>	<b>Descrizione dell'intervento</b>	<b>Freq. km</b>
PREDITTIVO	Ispezioni visive (condizioni ed usura dei pneumatici, tubazioni in gomma ...)	20000
	Ispezioni visive (cinghie trapezoidali e cinghie a V)	40000
	Ispezioni meccaniche (condizioni ed usura dei freni anteriori, frizione, regolazione del freno a mano, controllo delle emissioni inquinanti, controllo del motore e della centralina)	40000
	Ispezioni meccaniche (condizioni ed usura dei freni posteriori)	60000
	Ispezioni meccaniche (Controllo livello liquidi servosterzo e ABS)	80000
PREVENTIVO	Ripristino programmato (livello dei liquidi)	20000
	Sostituzione programmata (olio motore, filtro dell'olio, filtro dell'aria)	10000
	Sostituzione programmata (filtro carburante)	20000
	Sostituzione programmata (liquido del circuito frenante)	60000
	Sostituzione programmata (cinghia della distribuzione)	120000

Tabella 5.2: Scheda di manutenzione programmata dell'autovettura

Lo scopo di questa analisi, consiste quindi nell'ottimizzare la frequenza di sostituzione dell'olio motore, sfruttando in modo più razionale le riserve di affidabilità del sistema.

### 5.2.1 Rateo di guasto del motore indotto dall'olio

Focalizziamo, quindi, l'attenzione sul componente olio motore, che può indurre un guasto funzionale in termini di degrado della lubrificazione, con conseguenze sulle prestazioni, sull'integrità del motore ed in ultima analisi, sulla sicurezza della guida.

Per tale guasto funzionale si considerano due possibili modi di guasto:

1. deterioramento della funzione principale dell'olio: la lubrificazione.<sup>11</sup>
2. lubrificazione insufficiente, a causa del livello di olio troppo basso.

<sup>11</sup>A causa di variazioni della densità e delle caratteristiche fisiche e chimiche a seguito dell'utilizzo, o a causa della presenza di corpuscoli, impurità e residui carboniosi.

In particolare si è fatto ricorso all'opinione degli esperti per stimare la probabilità di guasto del motore, in condizioni di funzionamento senza sostituzioni o rabbocchi di olio. Considerando una vettura 'giovane', con percorrenza inferiore a 100000 km, si stima una probabilità di guasto dello 0.5% per un funzionamento protratto per 20000 km ed una probabilità di guasto del 99% (evento quasi certo!) per un funzionamento di 30000 km. La stima viene riconsiderata in modo peggiorativo per vetture che abbiano accumulato già un certo grado di usura con una percorrenza superiore ai 100000 km. Si veda la tabella 5.3 per una sintetica descrizione dell'opinione degli esperti.

<b>Età vettura &lt; 100000km</b>	
<i>Missione</i>	<i>Probabilità di guasto</i>
20000km	0.5%
30000km	99%
<b>Età vettura &gt; 100000km</b>	
<i>Missione</i>	<i>Probabilità di guasto</i>
20000km	1%
30000km	99.9%

Tabella 5.3: Sensibilità degli esperti al guasto motore

Procediamo ora a tradurre le informazioni di guasto in un opportuno modello matematico per la simulazione numerica.

Per cominciare, osserviamo che la sensazione comune è tale da indicare una rapida impennata della probabilità di guasto, a seguito di un periodo relativamente lungo di funzionamento senza guasti. Questa sensazione è riconducibile alle due diverse tipologie di guasto descritte sopra, e suggerisce l'implementazione di un modello di affidabilità con due opportune distribuzioni di Weibull. Durante la simulazione, inoltre, dovranno essere prese in considerazione due condizioni di carico<sup>12</sup> diverse al passare dei 100000km, tali da tenere in considerazione l'usura accumulata dal motore.

I parametri di forma  $\beta$  e di scala  $\vartheta$  delle curve Bi-Weibull di guasto di ogni singola condizione di carico vengono ricavati sfruttando le informazioni sulle probabilità di guasto fornite dagli esperti come segue:

Per la prima distribuzione di Weibull occorre fissare un ulteriore vincolo, per esempio scegliendo un fattore di forma  $\beta_1 = 3$ , che indica un andamento del rateo di guasto nel tempo crescente secondo un polinomio di grado 2. Per quanto riguarda il fattore di scala  $\vartheta_1$ , si può sfruttare l'imposizione della probabilità di guasto nota a 20000km risolvendo il sistema

<sup>12</sup>si veda la descrizione della logica di gestione dei carichi nel codice RAMSES, alla sez. 4.5.5.

seguinte:<sup>13</sup>

$$(a) \left\{ \begin{array}{l} \beta_1 = 3 \\ \mathcal{F}(20000) = 0.005 \\ \vartheta_1 = \frac{20000}{\beta_1 \sqrt{\ln\left(\frac{1}{1-\mathcal{F}(20000)}\right)}} \end{array} \right.$$

$$(b) \left\{ \begin{array}{l} \ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-\mathcal{F}(20000)}\right)\right] = \beta_2 \ln(20000) - \beta_2 \ln(\vartheta_2) \\ \ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-\mathcal{F}(30000)}\right)\right] = \beta_2 \ln(30000) - \beta_2 \ln(\vartheta_2) \\ \mathcal{F}(20000) = 0.005 \\ \mathcal{F}(30000) = 0.99 \end{array} \right.$$

I sistemi (a) e (b) sono di facile soluzione, e risolti con i valori  $\mathcal{F}(t)$  di probabilità di guasto di entrambe le condizioni di carico, portano ai parametri cercati delle distribuzioni di Weibull indicati in tabella 5.4.

<b>Età vettura &lt; 100000km</b>			
$\beta_1$	$\vartheta_1$	$\beta_2$	$\vartheta_2$
3	116863km	15.11	28395km
<b>Età vettura &gt; 100000km</b>			
$\beta_1$	$\vartheta_1$	$\beta_2$	$\vartheta_2$
3	92675km	15.11	27117km

Tabella 5.4: Parametri delle Bi-Weibull per la simulazione

In figura 5.9 è rappresentato l'andamento della funzione di probabilità di guasto indotto dall'olio, costituita dalle due distribuzioni di Weibull della seconda condizione di carico.<sup>14</sup>

## 5.2.2 Simulazione della politica di manutenzione ottima

Come prima simulazione consideriamo l'andamento della disponibilità del motore, soggetto al solo modo di guasto indotto dall'olio secondo i parame-

<sup>13</sup>I valori di probabilità di guasto  $\mathcal{F}(t)$  sono riferiti alla prima condizione di carico.

<sup>14</sup>In scala di localizzazione logaritmica assumono la forma di segmenti di retta.

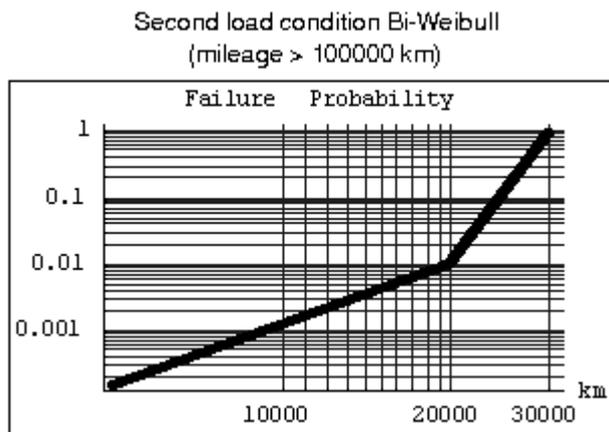


Figura 5.9: Diagramma Bi-Weibull di probabilità di guasto del motore

tri di tabella 5.4, e alla politica di manutenzione suggerita dal costruttore (tabella 5.2).

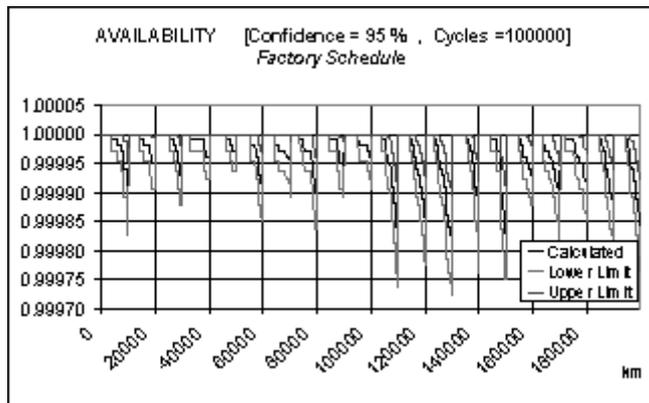


Figura 5.10: Disponibilità del motore con politica di manutenzione del costruttore

Il diagramma di figura 5.10 rappresenta l'andamento della disponibilità del motore, nel tempo, quando si effettua la sostituzione dell'olio ad intervalli regolari di  $10000\text{km}$  per tutta la vita della vettura, secondo quanto è specificato dal costruttore.

In particolare, osserviamo che in queste condizioni la disponibilità non scende mai al di sotto del valore di soglia 0.9998. Ciò significa che durante il corso della vita utile, la probabilità di guasti al motore dovuti a problemi di olio non supera mai il rapporto di 2 vetture su 10000. Si vede chiaramente,

tuttavia, che le risorse di affidabilità del motore non risultano adeguatamente sfruttate nei primi 100000 chilometri di vita.

Da questa osservazione nasce l'idea di ottimizzare le frequenze di sostituzione preventiva dell'olio a valori sensibilmente differenti nelle due fasi della vita della vettura. I risultati migliori si ottengono con il grafico di figura 5.11, simulando interventi di manutenzione preventiva ogni 15000km durante la prima condizione di carico (percorrenza vettura inferiore ai 100000km) ed infittendo a circa 9000km la frequenza degli interventi sull'olio durante la seconda condizione.

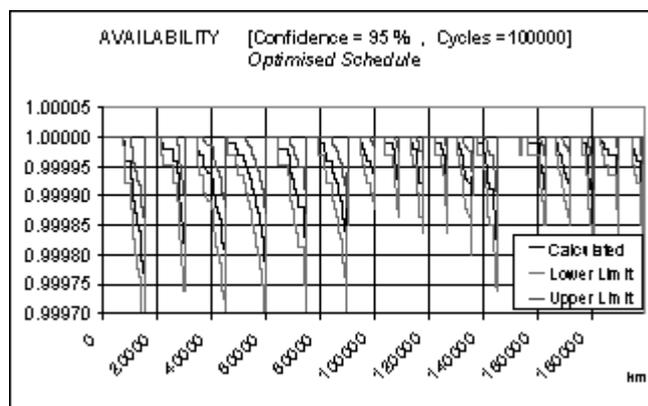


Figura 5.11: Disponibilità del motore con politica di manutenzione ottimizzata

Una particolarità del tipo di interventi preventivi simulati consiste nell'alternarsi di rabbocchi olio<sup>15</sup> alle sostituzioni complete dell'olio<sup>16</sup>. Per quanto riguarda gli interventi di ripristino, è stata avanzata l'ipotesi che il rabbocco di olio incida per il 50% della quantità totale di lubrificante.<sup>17</sup> Il codice RAMSES provvede quindi a ridurre l'usura del fluido del 50%, considerando che a seguito del rabbocco, metà dell'olio è fresco e metà soltanto rimane deteriorata.

## Conclusioni

Abbiamo visto, in questa sezione, come sia possibile utilizzare la simulazione numerica della manutenzione per sfruttare al massimo le risorse di affidabilità dei sistemi ottimizzandone la pianificazione degli interventi programmati.

<sup>15</sup>Manutenzione preventiva di ripristino.

<sup>16</sup>Manutenzione preventiva di sostituzione.

<sup>17</sup>Cioè metà dell'olio introdotto all'ultima sostituzione viene consumato prima dell'operazione di rabbocco.

In particolare, dal grafico di figura 5.11 si vede come la disponibilità risulti più uniforme, nel tempo, rispetto al caso in cui venga applicata la politica manutentiva del costruttore (figura 5.10). L'introduzione degli interventi di ripristino, alternati a quelli di sostituzione, e la rivisitazione delle opportune frequenze di manutenzione comporta il risparmio del 40% dei costi e soprattutto la riduzione del 60% dei tempi morti di cambio olio in officina. Il tutto mantenendo la soglia accettabile di indisponibilità pari a 2 parti su 10000 per tutto l'arco della missione.



## Capitolo 6

# Analisi dei guasti mediante MLE

In questo capitolo presentiamo un'applicazione del metodo MLE<sup>1</sup> al caso dell'analisi dei dati di guasto rilevati dal campo. In particolare formuleremo un modello di calcolo affidabilistico che tiene conto sia della difettosità che dell'usura dei componenti.

### 6.1 Il problema dell'analisi dei dati di guasto

Il successo di una simulazione di manutenzione dipende, in primo luogo, dalla qualità del modello matematico utilizzato per descrivere la fisica del guasto dei componenti. Una corretta stesura del modello richiede, pertanto, l'esecuzione di un'opportuna analisi dei dati di guasto, condotta secondo le fasi seguenti:

1. Identificazione del dominio della funzione di trasferimento dallo stato di funzionamento allo stato di guasto. Supporremo, come avviene nella norma, che la variabile idonea allo scopo sia il tempo.<sup>2</sup>
2. Pianificazione delle procedure di misura sperimentale del tempo al guasto. Disporre di procedure e di strumenti unificati è essenziale per garantire la ripetitività della misura e la consistenza dei dati, che possono essere raccolti da operatori diversi e su macchine diverse.
3. I dati devono essere catalogati suddividendoli per tipologia delle misure

---

<sup>1</sup> *Maximum Likelihood Estimator*.

<sup>2</sup> Nella pratica possono verificarsi situazioni in cui risulta più conveniente misurare delle percorrenze o dei cicli di carico.

effettuate e precisamente nelle classi di tempi al guasto,<sup>3</sup> tempi censurati per intervalli<sup>4</sup> e dati sospesi.<sup>5</sup> È inoltre conveniente che ad ogni campo di guasto siano aggiunte informazioni riguardanti l'anagrafica della macchina, i tempi logistici e tecnici di manutenzione, le risorse impegnate e, in generale, tutte le informazioni che possono rilevarsi utili per future elaborazioni statistiche.

4. Formulazione del modello matematico più adatto a descrivere il fenomeno del guasto. In particolare i metodi parametrici richiedono che si scelga a priori la famiglia di distribuzioni di probabilità da utilizzare.
5. Individuazione dei valori ottimi dei parametri, che rendono minima la distanza fra le previsioni del modello e la realtà dei dati sperimentali.

Esistono vari metodi per la ricerca dei parametri ottimi del modello di previsione del tempo al guasto. In particolare siamo interessati al metodo di stima di massima verosimiglianza, che introduciamo nella sezione seguente.

## 6.2 Principio di funzionamento del MLE

Il metodo della massima verosimiglianza è volto ad individuare il vettore dei parametri  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$  che permette al modello di replicare con la massima probabilità le osservazioni sperimentali.

A tal fine il metodo si appoggia sulla definizione della funzione di verosimiglianza:

$$L(\vec{x}) = \prod_{i=1}^{N_g} L_i(\vec{x}) \prod_{j=1}^{N_s} L_j(\vec{x}) \quad (6.1)$$

che fornisce, in corrispondenza di ogni singolo vettore  $\vec{x}$  di parametri possibili, la misura della verosimiglianza del relativo modello matematico di guasto. In tal senso l'espressione della funzione di verosimiglianza viene costruita sulla base delle informazioni sperimentali disponibili, moltiplicando fra loro i contributi  $L_i(\vec{x})$  dovuti ai tempi al guasto dei  $N_g$  componenti rotti ed i contributi  $L_j(\vec{x})$  dovuti ai tempi sospesi dei  $N_s$  componenti sopravvissuti.

Il significato fisico di verosimiglianza della funzione  $L(\vec{x})$  è una conseguenza della forma dei singoli contributi  $L_i$  ed  $L_j$ , ognuno dei quali esprime la probabilità che il modello sia in grado di replicare la relativa osservazione sperimentale.

---

<sup>3</sup>Il guasto è avvenuto esattamente al tempo misurato.

<sup>4</sup>Il guasto si è verificato all'interno di un intervallo di tempo  $[t_i, t_f]$ , ma non si sa esattamente quando.

<sup>5</sup>Al tempo di sospensione della prova il componente era ancora funzionante.

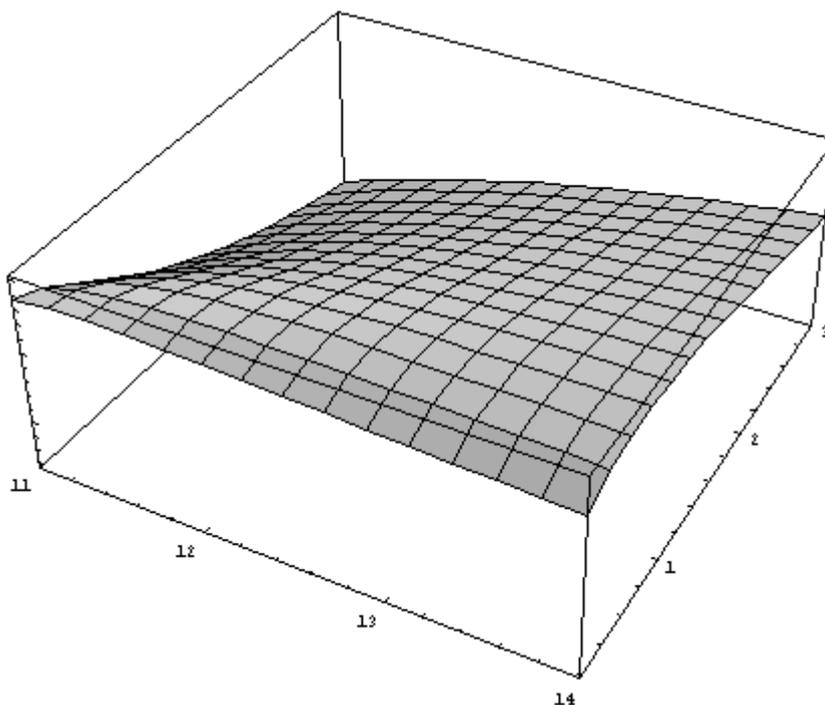


Figura 6.1: Superficie di massima verosimiglianza

Dall'equazione 6.1 si nota che  $L(\vec{x}) \in [0, 1]$ ,<sup>6</sup> e che il vettore dei parametri ottimo, come si mostra in figura 6.1 nel caso di vettori di parametri a due dimensioni  $\vec{x} = (x_1, x_2)$ , corrisponde al punto di massimo della  $L$ , da cui il nome del metodo MLE.

Dal punto di vista operativo, quindi, il problema dell'individuazione dei parametri si riduce al problema della formulazione dei contributi di verosimiglianza, partendo dalle ipotesi sul modello di guasto del sistema e dai dati sperimentali. Il problema della ricerca del punto di massimo della iper superficie  $L(\vec{x})$  nello spazio delle fasi  $m$  dimensionale dei parametri del modello  $(x_1, x_2, \dots, x_m)$  può essere convenientemente affrontato per via numerica implementando un opportuno algoritmo fra i tanti proposti in letteratura.

Concentriamo la nostra attenzione, quindi, alla formulazione dei contributi di verosimiglianza per i due casi del modello di affidabilità classico di guasto e del modello con difettosità ed usura dei componenti, esposti nelle sezioni che seguono.

---

<sup>6</sup>essendo il prodotto di termini tutti compresi in  $[0, 1]$ .

### 6.3 Contributi MLE per il modello di guasto classico

Il modello di guasto classico per il calcolo dell'affidabilità di un componente, considera un solo modo di guasto la cui funzione di trasferimento di stato,  $f(\vec{x}, t)$ , indica la densità di probabilità che il componente, funzionante in  $[0, t[$ , transiti allo stato di guasto esattamente al tempo  $t$ .

Consideriamo allora i contributi di verosimiglianza dovuti alle diverse tipologie dei dati:

#### 6.3.1 Tempi al guasto

Sia  $t_g$  il generico dato di tempo al guasto. In questo caso la probabilità che il modello sia in grado di replicare l'osservazione di guasto al tempo  $t_g$  è proporzionale al valore della funzione di transizione di stato calcolata in  $t_g$ . Possiamo quindi scrivere semplicemente:

$$L_i(\vec{x}) = f(\vec{x}, t_g)$$

#### 6.3.2 Dati di guasto censurati per intervalli

In questo caso  $t_g \in [t_i, t_f]$ , per cui il contributo di verosimiglianza risulta proporzionale alla probabilità che il modello preveda un guasto all'interno dell'intervallo di tempo misurato sperimentalmente. In formule:

$$L_i(\vec{x}) = \int_{t_i}^{t_f} f(\vec{x}, t) dt$$

Per i casi particolari di dati di guasto censurati a sinistra o a destra, è sufficiente introdurre la relativa correzione agli estremi di integrazione. Rispettivamente si ha:

$$L_i(\vec{x}) = \int_0^{t_f} f(\vec{x}, t) dt$$

e

$$L_i(\vec{x}) = \int_{t_i}^{+\infty} f(\vec{x}, t) dt$$

#### 6.3.3 Dati sospesi

Questi dati sono legati alla sopravvivenza del componente al tempo di funzionamento  $t_s$ , per cui il relativo contributo di verosimiglianza è proporzionale

all'affidabilità del componente calcolata al tempo  $t_s$ . Segue che:

$$L_j(\vec{x}) = 1 - \int_0^{t_s} f(\vec{x}, t) dt$$

### 6.3.4 Esempio di applicazione del MLE — caso classico

Per chiarire meglio la metodologia di analisi dei dati di guasto secondo il metodo della massima verosimiglianza, consideriamo un esempio di applicazione ad un caso automobilistico.<sup>7</sup>

Il modello di affidabilità utilizzato è il modello classico, con un solo modo di guasto. Nel nostro caso particolare, assumiamo come funzione di trasferimento di stato la distribuzione di Weibull a due parametri:

$$f(\beta, \vartheta, t) = \frac{\beta}{\vartheta} \left(\frac{t}{\vartheta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\vartheta}\right)^\beta}$$

Classe		n°
km inizio	km fine	guasti
0	2500	2
2500	5000	6
5000	7500	6
7500	10000	2
10000	12500	3
12500	15000	2
15000	17500	2

Tabella 6.1: Dati di guasto censurati per intervalli: eventi di guasto raccolti per classi di percorrenza chilometrica

Per i dati di guasto di tabella 6.1, il singolo contributo dell'intera classe di indice  $i$ , con  $i = 1, \dots, 7$  vale:

$$L_i(\beta, \vartheta) = \left( \int_{2500(i-1)}^{2500i} \frac{\beta}{\vartheta} \left(\frac{t}{\vartheta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\vartheta}\right)^\beta} dt \right)^{n_i}$$

con  $n_i$  pari al numero di guasti riscontrati all'interno della classe  $i$ .

Per quanto riguarda, invece, i contributi delle vetture sopravvissute elencati in tabella 6.2, si può considerare per ogni singola classe  $j$ , con

<sup>7</sup>Per questo caso, osserviamo che la variabile che meglio descrive l'evoluzione del guasto è la percorrenza chilometrica. I dati di guasto e di sopravvivenza verranno quindi espressi in km.

Classe		n° vetture superstiti
km inizio	km fine	
0	2500	7848
2500	5000	13582
5000	7500	8855
7500	10000	5500
10000	12500	2424
12500	15000	1379
15000	17500	611
17500	20000	395
20000	22500	158
22500	25000	114
25000	27500	49
27500	30000	57

Tabella 6.2: Dati di guasto censurati per intervalli: vetture superstiti per classi di percorrenza chilometrica

$j = 1, \dots, 12$  il termine seguente:

$$L_j(\beta, \vartheta) = \left( 1 - \int_0^{2500(j-0.5)} \frac{\beta}{\vartheta} \left( \frac{t}{\vartheta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\vartheta}\right)^\beta} dt \right)^{m_j}$$

con esponente  $m_j$  pari al numero di vetture sopravvissute alla data odierna, con percorrenza all'interno della classe  $j$ .<sup>8</sup>

In ultimo si può scrivere la funzione di verosimiglianza come:

$$L(\beta, \vartheta) = \prod_{i=1}^7 L_i(\beta, \vartheta) \prod_{j=1}^{12} L_j(\beta, \vartheta)$$

o, in alternativa, si può considerare il logaritmo della funzione di verosimiglianza<sup>9</sup>

$$\mathcal{L}(\beta, \vartheta) = \sum_{i=1}^7 \mathcal{L}_i(\beta, \vartheta) + \sum_{j=1}^{12} \mathcal{L}_j(\beta, \vartheta) \quad (6.2)$$

Naturalmente, essendo l'operatore logaritmico monotono crescente, cercare il massimo della funzione di verosimiglianza equivale a cercare il massimo della 6.2.

---

<sup>8</sup>Si noti, quindi, che per l'estremo superiore di integrazione si assume la percorrenza media della singola classe.

<sup>9</sup>Nota in letteratura come *Log Likelihood*.

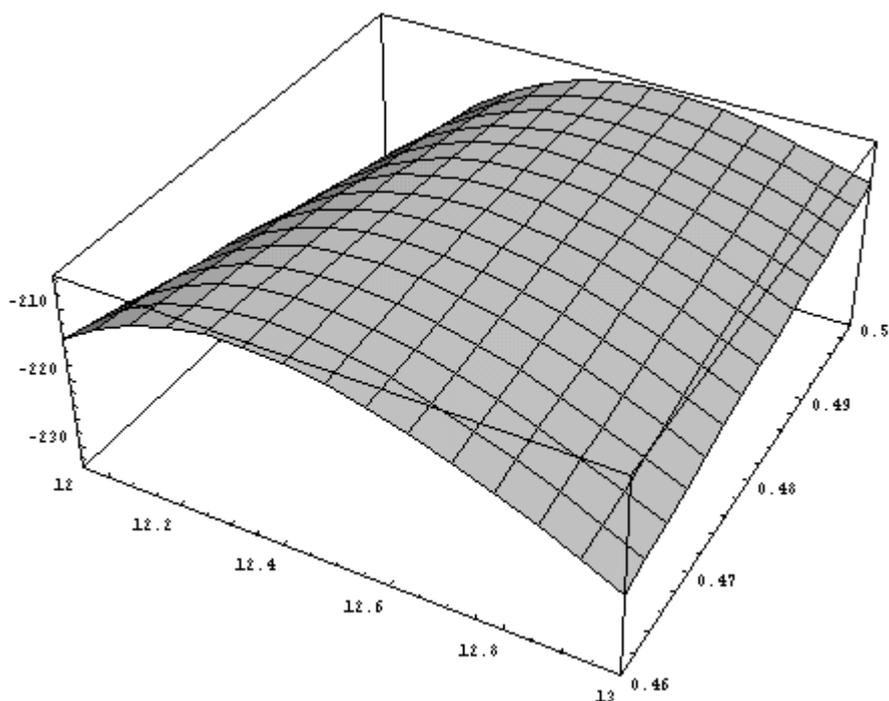


Figura 6.2: Superficie di massima verosimiglianza logaritmica

La funzione di verosimiglianza logaritmica viene rappresentata in figura 6.2.<sup>10</sup> In particolare, il punto di massimo si ottiene in corrispondenza dei parametri  $\beta$  e  $\vartheta$  seguenti:

$$\begin{aligned}\beta &= 2.062 \\ \vartheta &= 272240 \text{ km}\end{aligned}$$

che espressi nella notazione di scala logaritmica utilizzata nei calcoli diventano:

$$\begin{aligned}\beta' &= \frac{1}{\beta} = 0.4861 \\ \vartheta' &= \ln \vartheta = 12.5144 \text{ km}\end{aligned}$$

## 6.4 Contributi MLE per il modello di guasto con difettosità

Il modello di calcolo di affidabilità che introduciamo in questa sezione, prevede la possibilità di considerare due modi di guasto concorrenti. Il primo è legato alla presenza di eventuali difetti di fabbricazione, e pertanto interessa

<sup>10</sup>Si noti che la *Log Likelihood* restituisce valori nell'intervallo  $]-\infty, 0[$ .

una frazione limitata  $p$  della popolazione; il secondo è invece un modo di guasto comune a tutti i componenti, in quanto viene causato dalla naturale usura di esercizio.

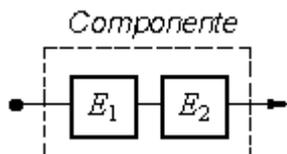


Figura 6.3: Diagramma a blocchi di affidabilità di un componente con due modi di guasto

Dal punto di vista del diagramma a blocchi di affidabilità, il componente viene considerato come la serie di due unità di base, come si mostra in figura 6.3, a ciascuna delle quali compete un solo modo di guasto con la relativa funzione di trasferimento.

I due modi di guasto sono fra loro fisicamente indipendenti, per cui l'affidabilità del sistema si ricava per il teorema di moltiplicazione delle probabilità come segue:

$$\mathcal{R}(\vec{\Omega}, t) = (1 - p F_1(\vec{\omega}_1, t)) \times (1 - F_2(\vec{\omega}_2, t)) \quad (6.3)$$

dove  $p$  è il coefficiente di difettosità, mentre  $F_1$  ed  $F_2$  sono le cumulate delle funzioni di trasferimento. In particolare osserviamo che il termine di probabilità di guasto dovuto al difetto viene calcolato considerando che il componente deve essere in primo luogo difettoso (evento con probabilità  $p = N_d/N_0$ <sup>11</sup>), e che, in secondo luogo, tale difetto deve manifestarsi entro il tempo  $t$  (evento con probabilità  $F_1(\vec{\omega}_1, t)$ ).

Derivando la 6.3 si ottiene la forma della densità di probabilità di guasto del componente, in funzione dei parametri  $\vec{\Omega}$  del modello di trasferimento utilizzato e del tempo:

$$f_{sys}(\vec{\Omega}, t) = p f_1(\vec{\omega}_1, t)(1 - F_2(\vec{\omega}_2, t)) + f_2(\vec{\omega}_2, t)(1 - p F_1(\vec{\omega}_1, t)) \quad (6.4)$$

Nella costruzione dei contributi dei dati sperimentali alla funzione di verosimiglianza è utile, anzi doveroso, sfruttare eventuali informazioni aggiuntive sull'origine del guasto. È a volte possibile, infatti, distinguere i guasti generati dai difetti di fabbricazione dai guasti dovuti all'usura.

<sup>11</sup>La difettosità  $p$  può essere interpretata come il rapporto fra i componenti  $N_d$  usciti difettosi dalla produzione ed il totale  $N_0$  dei prodotti.

### 6.4.1 Tempi al guasto

Come abbiamo visto nella sezione precedente, il termine di verosimiglianza è proporzionale alla densità di probabilità di guasto. Elenchiamo, quindi, le formule dei contributi  $L_i(\vec{\Omega})$  in funzione della provenienza del tempo al guasto  $t_{gi}$ :

- Difetti

$$L_i(\vec{\omega}_1) = p f_1(\vec{\omega}_1, t_{gi})$$

- Guasti dovuti all'obsolescenza o all'usura

$$L_i(\vec{\omega}_2) = f_2(\vec{\omega}_2, t_{gi})$$

- Guasti di provenienza incognita

$$L_i(\vec{\Omega}) = f_{sys}(\vec{\Omega}, t_{gi})$$

dove  $f_{sys}$  è la funzione densità di probabilità di guasto del componente, come indicato nell'equazione 6.4

### 6.4.2 Dati di guasto censurati per intervalli

In questo caso il contributo alla funzione di verosimiglianza deve essere calcolato come la probabilità che il tempo reale di guasto  $t_g$  ricada all'interno dell'intervallo misurato sperimentalmente  $[t_{gi}, t_{gf}]$ . In formule si ha:

- Difetti

$$L_i(\vec{\omega}_1) = \int_{t_{gi}}^{t_{gf}} p f_1(\vec{\omega}_1, t) dt$$

- Guasti dovuti all'obsolescenza o all'usura

$$L_i(\vec{\omega}_2) = \int_{t_{gi}}^{t_{gf}} f_2(\vec{\omega}_2, t) dt$$

- Guasti di provenienza incognita

$$L_i(\vec{\Omega}) = \int_{t_{gi}}^{t_{gf}} f_{sys}(\vec{\Omega}, t) dt$$

o in alternativa, usando l'espressione 6.3 nota delle cumulate delle funzioni di trasferimento:

$$L_i(\vec{\Omega}) = \left[ p F_1(\vec{\omega}_1, t) + F_2(\vec{\omega}_2, t) - p F_1(\vec{\omega}_1, t) F_2(\vec{\omega}_2, t) \right]_{t_{gi}}^{t_{gf}}$$

### 6.4.3 Dati sospesi

Ancora una volta, consideriamo la forma dei contributi di verosimiglianza nei termini dell'affidabilità dei componenti superstiti al tempo  $t_{sj}$ , osservando che, in questo caso, il componente è senz'altro sopravvissuto a entrambi i modi di guasto:

$$L_j(\vec{\Omega}) = \int_{t_{sj}}^{+\infty} f_{sys}(\vec{\Omega}, t) dt$$

o in alternativa, usando l'espressione 6.3 nota delle cumulate delle funzioni di trasferimento:

$$L_j(\vec{\Omega}) = \lim_{t \rightarrow +\infty} \left[ p F_1(\vec{\omega}_1, t) + F_2(\vec{\omega}_2, t) - p F_1(\vec{\omega}_1, t) F_2(\vec{\omega}_2, t) \right]_{t_{sj}}^t$$

### 6.4.4 Esempio di applicazione del MLE con difettosità

Consideriamo, in questa sezione, i risultati del metodo MLE applicato agli stessi dati di guasto del problema presentato nella sezione 6.3.4, con l'introduzione del parametro di difettosità di produzione nel modello di affidabilità. Come ulteriore informazione sulla tipologia dei guasti, si è utilizzata la specifica richiesta del committente di considerare tutti i dati di guasto dovuti ai soli componenti difettosi.

Alla luce di questa ipotesi, il modello può essere formulato con il solo modo di guasto relativo alla difettosità, da cui segue che la densità di probabilità di guasto è semplicemente  $p \times f(\vec{\omega}, t)$

I contributi di verosimiglianza del tipo  $L_i(\vec{\omega})$  relativi ai dati di guasto della tabella 6.1 assumono la seguente forma:

$$L_i(\beta, \vartheta, p) = \left( p \int_{2500(i-1)}^{2500i} \frac{\beta}{\vartheta} \left( \frac{t}{\vartheta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\vartheta}\right)^\beta} dt \right)^{n_i}$$

dove  $n_i$  è pari al numero di guasti riscontrati all'interno della classe  $i$ ;  $i = 1, \dots, 7$  e dove per la  $f(\vec{\omega}, t)$  si è utilizzata la distribuzione di Weibull.

In modo formalmente simile a quanto fatto nella sezione 6.3.4 possiamo trattare i dati delle percorrenze chilometriche delle vetture superstiti di tabella 6.2 come segue:

$$L_j(\beta, \vartheta, p) = \left( 1 - p \int_0^{2500(j-0.5)} \frac{\beta}{\vartheta} \left( \frac{t}{\vartheta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\vartheta}\right)^\beta} dt \right)^{m_j}$$

dove  $m_j$  è pari al numero di vetture sopravvissute, con  $j = 1, \dots, 12$  indice delle singole classi.

L'algoritmo di ricerca del massimo della funzione *Log Likelihood*  $\mathcal{L}$  fornisce i seguenti risultati dei parametri incogniti:

$$\begin{aligned}\beta &= 2.29 \\ \vartheta &= 22000 \text{ km} \\ p &= 0.8\%\end{aligned}$$

In figura 6.4 si può osservare il risultato del metodo della massima verosimiglianza, che sovrapposto alla stima del committente mostra un ottimo accordo.

Il valore aggiunto di questo modello di calcolo, tuttavia, non consiste tanto nel fornire la stima della probabilità di guasto di un componente generico,  $F(t)$ , quanto nel suddividere il valore di questa stima nella probabilità che il componente in esame sia difettoso e nella probabilità di guasto dei soli componenti difettosi:  $F(t) = p F_1(t)$ .

L'espressione della funzione cumulata di guasto dei componenti difettosi nel nostro caso è la distribuzione di Weibull calcolata in funzione del vettore di parametri  $\vec{\omega} = (\beta, \vartheta) = (2.29, 22000 \text{ km})$ :

$$F_1(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{22000}\right)^{2.29}}$$

Possiamo allora utilizzare questa distribuzione di probabilità per calcolare la percentuale di componenti difettosi superstiti in funzione della percorrenza chilometrica.

<b>km</b>	<b>Difettosi superstiti</b>
10000	85%
11500	80%
14000	70%
50000	0.14%

Tabella 6.3: Andamento dei componenti difettosi superstiti nel parco di vetture circolanti

Questa informazione, che rappresentiamo schematicamente in tabella 6.3, risulta essere di estremo interesse per la direzione aziendale, che può così stimare l'andamento dei ritorni dal campo dei pezzi guasti a causa delle difettosità di produzione.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup>Si può, in tal modo ottimizzare la sovrapproduzione dei pezzi di ricambio sulla base della stima dell'effettivo fabbisogno futuro, e ci si può eventualmente cautelare dalle spiacevoli conseguenze dei guasti previa l'organizzazione delle opportune campagne di richiamo.

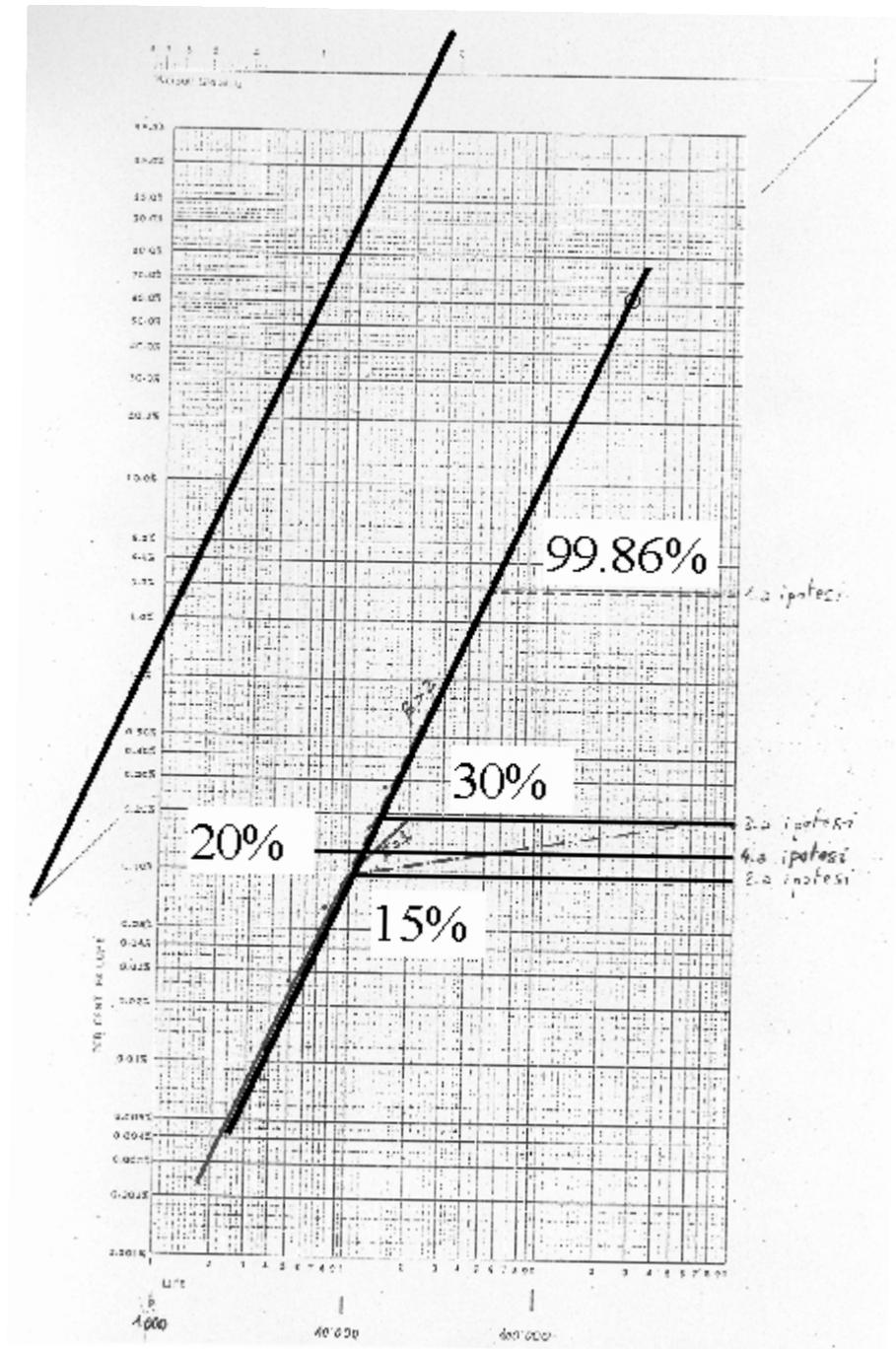


Figura 6.4: Probabilità di guasto in funzione dei km percorsi e percentuale di componenti difettosi superstiti

In figura 6.4 si mostra l'informazione complementare alla percentuale di difettosi superstiti e cioè si indica in corrispondenza dei tagli orizzontali, la percentuale dei componenti difettosi che ha manifestato il guasto.

Concludiamo il capitolo riservato all'analisi dei dati di guasto mediante il metodo della massima verosimiglianza con le seguenti osservazioni:

- un modello MLE a 2 parametri permette un controllo visivo sulla forma della funzione di massima verosimiglianza e sulla posizione del punto di massimo.
- Un modello MLE con l'introduzione del parametro difettosità permette di valutare la soglia di percorrenza oltre la quale i componenti difettosi si possono ritenere esauriti.
- La flessibilità del MLE consente di modellare situazioni di guasto 'ad hoc' quali, per esempio, la presenza di due modi di guasto concorrenti.



# Conclusioni e sviluppi futuri

Abbiamo visto come sia possibile utilizzare i metodi dell'ingegneria dei sistemi per la soluzione di semplici processi stocastici nello studio dell'affidabilità e della disponibilità di componenti riparabili. Dopo la descrizione delle strategie di pianificazione della manutenzione mirate all'affidabilità, alla sicurezza ed alla salvaguardia dell'ambiente, abbiamo introdotto le tecniche di simulazione numerica al calcolatore. In particolar modo è stato presentato il metodo Monte Carlo, come strumento per studiare la realistica evoluzione di sistemi più complessi, tenendo conto delle interazioni di causa ed effetto dei guasti e delle dipendenze logiche fra i componenti. Abbiamo mostrato, in ultima analisi, come sia possibile trarre il massimo vantaggio dalle valutazioni comparative di efficacia e di efficienza delle diverse politiche di manutenzione applicate allo stesso sistema, ottimizzando in tal modo gli obiettivi di disponibilità e sicurezza, nonché la gestione delle risorse manutentive scarse.

Questo processo, tuttavia, permette al momento la sola verifica degli effetti di un piano di manutenzione impostato dall'utente. Sono quindi previsti sviluppi futuri del codice, che riguardano l'implementazione dei metodi del progetto dell'esperimento (D.O.E.) per l'ottimizzazione del processo di simulazione. L'idea consiste nel creare un sistema esperto che sia in grado di individuare i fattori dominanti, quali ad esempio le frequenze di ispezione, sui componenti caratterizzati dai maggiori livelli di *Reliability Importance*, al fine di stabilire le corrette direzioni per l'ottimizzazione automatica, o parzialmente automatica del piano di manutenzione.

Per quanto riguarda l'analisi dei dati sperimentali di guasto, problema questo di fondamentale importanza per la formulazione di modelli numerici accurati e realistici dei componenti, sono previsti un'intensa applicazione e lo sviluppo dei metodi di stima di massima verosimiglianza.

In conclusione, l'esperienza maturata durante l'esecuzione di numerose applicazioni tecniche, ed il continuo confronto con i professionisti del settore, portano a sottolineare l'indubbia utilità della simulazione numerica affiancata alla corretta pianificazione e al controllo della manutenzione.

Il futuro dell'Ingegneria di Manutenzione è nel potenziamento delle

tecniche di 'condition monitoring' e nello sviluppo degli strumenti di simulazione numerica, che saranno essenziali nel guidare la fase di pianificazione degli interventi di manutenzione condizionale, volti allo studio e al controllo dell'evoluzione di situazioni di preguasto.

# Appendice A

## Teoria della probabilità

Raccogliamo in questa appendice le nozioni di base ed i risultati fondamentali della teoria della probabilità che trovano una diretta applicazione nello studio dell'affidabilità dei sistemi e nelle simulazioni di manutenzione.

### A.1 Definizioni

#### A.1.1 Spazio campione, campo degli eventi, probabilità

Osserviamo, per cominciare, che il modello matematico di un esperimento con risultati aleatori consiste nell'insieme dei tre oggetti  $\Omega$ ,  $\Psi$ ,  $\mathcal{P}$ , rispettivamente lo spazio campione, il campo degli eventi e la probabilità degli eventi. Per esempio,  $\Omega = [0, +\infty[$  nel caso del tempo al guasto di un componente. Il campo  $\Psi$  contiene tutti i sottoinsiemi di  $\Omega$  (gli eventi) per i quali è possibile assegnare un valore di probabilità.

Ricordiamo alcune regole di base per la composizione degli eventi  $\psi_i$ :

- l'unione numerabile di eventi  $\psi_1 \cup \psi_2 \cup \dots \cup \psi_n$ , o  $\bigcup_i \psi_i$  è un evento che accade se e solo se accade almeno uno degli eventi  $\psi_i$
- l'intersezione numerabile di eventi  $\psi_1 \cap \psi_2 \cap \dots \cap \psi_n$ , o  $\bigcap_i \psi_i$  è un evento che accade se e solo se accadono tutti gli eventi  $\psi_i$
- l'evento  $\bar{\psi}$ , complementare di  $\psi$ , accade se e solo se  $\psi$  non accade. In particolare  $\bar{\bar{\psi}} = \{\omega \in \Omega : \omega \notin \bar{\psi}\} = \Omega \setminus \bar{\psi}$ . Come è noto vale:  $\psi \cup \bar{\psi} = \Omega$  e  $\psi \cap \bar{\psi} = \emptyset$

Il campo degli eventi  $\Psi$  ha le seguenti proprietà:

1.  $\Omega \in \Psi$

2. se l'evento  $\psi \in \Psi$  anche l'evento complementare  $\bar{\psi} \in \Psi$
3. se gli eventi  $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$  appartengono a  $\Psi$ , allora anche l'unione numerabile  $\bigcup_i \psi_i \in \Psi$

da cui discende, anche, che  $\emptyset \in \Psi$  e  $\bigcap_i \psi_i \in \Psi$ .

Per le operazioni di intersezione e di unione degli eventi valgono le consuete proprietà commutativa, associativa e distributiva. Per la loro importanza, ricordiamo anche le seguenti leggi:

- legge dell'idempotenza:  $\psi \cup \psi = \psi$ ;  $\psi \cap \psi = \psi$
- legge di De Morgan:  $\overline{\psi \cup \varphi} = \bar{\psi} \cap \bar{\varphi}$ ;  $\overline{\psi \cap \varphi} = \bar{\psi} \cup \bar{\varphi}$
- legge di identità:  $\bar{\bar{\psi}} = \psi$ ;  $\psi \cup (\bar{\psi} \cap \varphi) = \psi \cup \varphi$

Due eventi  $\psi$  e  $\varphi$  si dicono *mutuamente escludentisi* se la loro intersezione è l'insieme vuoto:  $\psi \cap \varphi = \emptyset$ . Si dicono equivalenti se  $\psi$  accade se e solo se accade  $\varphi$ . Due eventi equivalenti hanno la stessa probabilità.

La prima intuitiva definizione di probabilità di un evento aleatorio  $\psi$  può essere data sulla base delle osservazioni sperimentali:

$$\mathcal{P}(\psi) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{k}{n}$$

dove  $k$  indica il numero delle volte che si è verificato l'evento  $\psi$  durante le  $n$  ripetizioni dell'esperimento. Naturalmente, per un numero finito di prove,  $\hat{p}(\psi) = k/n$  è il valore stimato della probabilità dell'evento  $\psi$ . Quando  $n$  tende all'infinito,  $\hat{p}(\psi)$  converge a  $\mathcal{P}(\psi)$ .

Valgono le seguenti proprietà:

1.  $\hat{p}(\psi) \in [0, 1]$
2.  $\hat{p}(\bar{\psi}) = 1 - \hat{p}(\psi)$
3.  $\hat{p}(\emptyset) = 0$ ;  $\hat{p}(\Omega) = 1$
4. se  $\psi \subseteq \varphi$ , allora  $\hat{p}(\psi) \leq \hat{p}(\varphi)$
5. se  $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m$  sono eventi mutuamente escludentisi, allora  $\hat{p}(\bigcup_i \psi_i) = \sum_i \hat{p}(\psi_i)$

### A.1.2 Probabilità condizionale ed indipendenza statistica

Il concetto della probabilità condizionale è di notevole importanza nell'ingegneria di manutenzione, dove gli eventi di riparazione sono naturalmente legati agli eventi di guasto. Dal punto di vista teorico è facile intuire che conoscere a priori se l'evento  $\psi$  è accaduto o meno, può modificare la probabilità degli altri eventi del campo  $\Psi$ .<sup>1</sup>

Dal punto di vista matematico, consideriamo la ripetizione di  $n$  prove sperimentali, con  $k$  osservazioni dell'evento  $\psi$ ,  $k > 0$ , e  $h$  osservazioni di entrambi gli eventi  $\psi$  e  $\varphi$ . La probabilità di  $\varphi$  condizionata a  $\psi$ ,  $\hat{p}(\varphi|\psi)$  si calcola come il numero di casi favorevoli divisi i casi possibili. Visto che si suppone che  $\psi$  sia dato, i casi possibili sono esattamente  $k$ . All'interno dei  $k$  casi possibili, gli unici favorevoli sono quelli in cui si sia verificato anche l'evento  $\varphi$ , cioè  $h$ . Segue che:

$$\hat{p}(\varphi|\psi) = \frac{h}{k} = \frac{h/n}{k/n} = \frac{\hat{p}(\psi \cap \varphi)}{\hat{p}(\psi)} \quad (\text{A.1})$$

Dalla A.1 segue anche che si può esprimere la probabilità dell'intersezione fra due eventi  $\psi$  e  $\varphi$  come:

$$\mathcal{P}(\psi \cap \varphi) = \mathcal{P}(\psi)\mathcal{P}(\varphi|\psi) = \mathcal{P}(\varphi)\mathcal{P}(\psi|\varphi)$$

Nel caso in cui i due eventi  $\psi$  e  $\varphi$  siano indipendenti, si vede chiaramente che risulta:

$$\mathcal{P}(\psi|\varphi) = \mathcal{P}(\psi)$$

cioè l'evento  $\psi$  non è influenzato dal fatto che sia accaduto o meno l'evento  $\varphi$  e viceversa. In via del tutto generale, nell'ipotesi di indipendenza statistica fra i due eventi, si può anche scrivere:

$$\mathcal{P}(\psi \cap \varphi) = \mathcal{P}(\psi)\mathcal{P}(\varphi)$$

## A.2 Teoremi sulla teoria della probabilità

Il calcolo della probabilità di opportune combinazioni di eventi, come il guasto di due componenti in parallelo, viene risolto sulla base delle regole introdotte in questa sezione.

---

<sup>1</sup>È chiaro che la probabilità di ricevere un fulmine sulla testa è ben diversa fra il caso in cui il cielo sia sereno ed il caso in cui si sia appena scatenata una tempesta!

### A.2.1 Addizione per eventi mutuamente escludentisi

Siano  $\psi$  e  $\varphi$  eventi tali per cui  $\psi \cap \varphi = \emptyset$ . Vale, allora:

$$\mathcal{P}(\psi \cup \varphi) = \mathcal{P}(\psi) + \mathcal{P}(\varphi)$$

### A.2.2 Moltiplicazione per due eventi indipendenti

Due eventi  $\psi$  e  $\varphi$  sono fra loro indipendenti, se la conoscenza del fatto che il primo sia accaduto o meno non altera la probabilità che accada il secondo e viceversa. Si ha allora:

$$\mathcal{P}(\psi \cap \varphi) = \mathcal{P}(\psi)\mathcal{P}(\varphi)$$

### A.2.3 Moltiplicazione per due eventi arbitrari

Se  $\psi$  e  $\varphi$  sono due eventi arbitrari, allora, per la definizione di probabilità condizionata si ha:

$$\mathcal{P}(\psi \cap \varphi) = \mathcal{P}(\psi)\mathcal{P}(\varphi|\psi) = \mathcal{P}(\varphi)\mathcal{P}(\psi|\varphi)$$

### A.2.4 Addizione per eventi arbitrari

Se  $\psi$  e  $\varphi$  sono due eventi arbitrari e indipendenti, allora la probabilità dell'unione vale:

$$\mathcal{P}(\psi \cup \varphi) = \mathcal{P}(\psi) + \mathcal{P}(\varphi) - \mathcal{P}(\psi \cap \varphi)$$

La dimostrazione è immediata, scrivendo  $\psi \cup \varphi$  come l'unione di due eventi mutuamente escludentisi ed applicando il teorema dell'addizione ed il teorema della moltiplicazione per tale caso:

$$\psi \cup \varphi = \psi \cup (\bar{\psi} \cap \varphi)$$

$$\mathcal{P}[\psi \cup (\bar{\psi} \cap \varphi)] = \mathcal{P}(\psi) + [1 - \mathcal{P}(\psi)]\mathcal{P}(\varphi)$$

da cui segue la tesi.

### A.2.5 Teorema della probabilità totale

Siano  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$  eventi mutuamente escludentisi, tali che  $\mathcal{P}(\varphi_i) > 0 \forall i$  e

$$\bigcup_{i=1}^m \varphi_i = \Omega$$

allora

$$\mathcal{P}(\psi) = \mathcal{P}\left(\bigcup_{i=1}^m \psi \cap \varphi_i\right) = \sum_{i=1}^m \mathcal{P}(\psi \cap \varphi_i)$$

da cui si ha:

$$\mathcal{P}(\psi) = \sum_{i=1}^m \mathcal{P}(\varphi_i) \mathcal{P}(\psi|\varphi_i)$$

Il risultato è immediato applicando i teoremi dell'addizione e della moltiplicazione.

### A.2.6 Legge dei grandi numeri

Consideriamo la variabile aleatoria  $X$ , con speranza matematica  $E[X] = \mu$  e la sequenza di  $n$  esperimenti con risultato  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Sia  $S_n$  la variabile aleatoria somma dei risultati sperimentali,  $S_n = \sum_i X_i$ . Allora la legge dei grandi numeri impone:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \mathcal{P}\left(\left|\frac{S_n}{n} - \mu\right| > \epsilon\right) = 0$$

Più propriamente, questa è la forma debole della legge dei grandi numeri, che esprime la convergenza in probabilità di  $S_n/n$  a  $\mu$ .

### A.2.7 Teorema del limite centrale

Nelle stesse ipotesi che abbiamo avanzato per la legge dei grandi numeri, se in aggiunta  $\sigma^2 = E[(X - \mu)^2]$  è la varianza della variabile aleatoria  $X$ ,  $\forall \gamma \in ]-\infty, +\infty[$  si ha:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{P}\left(\frac{S_n - \mu n}{\sigma \sqrt{n}} < \gamma\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\gamma} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

Questo teorema indica, che per grandi  $n$ , la distribuzione di  $S_n$  può essere approssimata dalla  $N(n\mu, n\sigma^2)$ , distribuzione Normale con valore medio  $n\mu$  e varianza  $n\sigma^2$ .

## A.3 Funzioni distribuzione di probabilità

Presentiamo, in questa sezione, una rassegna schematica delle principali distribuzioni di probabilità utilizzate nel caso delle simulazioni numeriche di manutenzione, tenendo presente la seguente espressione della funzione  $\Gamma(z)$ :

$$\Gamma(z) = \int_0^{+\infty} x^{z-1} e^{-x} dx$$

che interverrà spesso nel seguito.

### A.3.1 Esponenziale

**p.d.f.**

$$\lambda e^{-\lambda t}$$

**C.D.F.**

$$1 - e^{-\lambda t}$$

**hazard**

$$\lambda$$

**valor medio**

$$\frac{1}{\lambda}$$

**varianza**

$$\frac{1}{\lambda^2}$$

**note** La distribuzione esponenziale è molto diffusa per la sua semplicità d'uso, ma non permette di conservare la memoria del passato, per cui non si può utilizzare per descrivere comportamenti di guasti infantili o di usura dei componenti.

### A.3.2 Weibull

**p.d.f.**

$$\lambda\beta (\lambda t)^{\beta-1} e^{-(\lambda t)^\beta}$$

**C.D.F.**

$$1 - e^{-(\lambda t)^\beta}$$

**hazard**

$$\beta\lambda (\lambda t)^{\beta-1}$$

**valor medio**

$$\frac{\Gamma(1 + 1/\beta)}{\lambda}$$

**varianza**

$$\frac{\Gamma(1 + 2/\beta) - \Gamma^2(1 + 1/\beta)}{\lambda^2}$$

**note** Il parametro  $\beta$  è legato alla forma della distribuzione, mentre il parametro  $\lambda$  alla scala della variabile aleatoria  $t$ . La distribuzione di Weibull è più versatile rispetto alla distribuzione esponenziale, a cui si riconduce nel caso  $\beta = 1$ . La Weibull è soprattutto usata per la caratteristica di presentare un rateo di guasto polinomiale strettamente

decescente per  $\beta < 1$  e strettamente crescente per  $\beta > 1$ . Questa proprietà la rende particolarmente adatta a descrivere i periodi iniziale e finale della curva del rateo di guasto di un componente a 'vasca da bagno'.

### A.3.3 Gamma

**p.d.f.**

$$\lambda \frac{(\lambda t)^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} e^{-(\lambda t)}$$

**C.D.F.**

$$\frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^{\lambda t} x^{\beta-1} e^{-x} dx$$

**hazard**

$$\frac{\lambda (\lambda t)^{\beta-1} e^{-(\lambda t)}}{\Gamma(\beta) - \int_0^{\lambda t} x^{\beta-1} e^{-x} dx}$$

**valor medio**

$$\frac{\beta}{\lambda}$$

**varianza**

$$\frac{\beta}{\lambda^2}$$

**note** Come per la Weibull, la funzione hazard della distribuzione di probabilità Gamma è costante per  $\beta = 1$ , monotona decrescente per  $\beta < 1$  e monotona crescente per  $\beta > 1$ , con l'unica differenza che per  $t \rightarrow \infty$  converge sempre a  $\lambda$ .

**Distribuzione di Erlang** Quando il parametro di forma  $\beta$  è intero,  $\beta = n = 2, 3, \dots$  la distribuzione Gamma prende il nome di distribuzione di Erlang, con parametri  $\lambda$  ed  $n$ . Ciò che è importante dal punto di vista fisico è che la variabile aleatoria  $t$  può essere considerata come la somma di  $n$  variabili aleatorie indipendenti  $\tau_i$ , distribuite esponenzialmente con parametro  $\lambda$ .<sup>2</sup> La C.D.F. della distribuzione di Erlang diventa, quindi:

$$F(t) = \mathcal{P} \{ \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n \leq t \} = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}$$

---

<sup>2</sup>Questo caso è molto interessante per il modello del tempo al guasto a seguito di picchi elevatissimi di carico accidentali. Per esempio le sospensioni automobilistiche possono assorbire un massimo di  $n$  urti dovuti a buche nell'asfalto. Gli eventi di urto sono infatti del tutto casuali. Un altro esempio può essere legato alle sollecitazioni accidentali di *scram* del reattore sul circuito primario.

**Distribuzione  $\chi^2$**  Quando  $\lambda = 1/2$  e  $\beta = \nu/2$ ,  $\nu = 1, 2, \dots$  la distribuzione Gamma prende il nome di distribuzione  $\chi^2$  con  $\nu$  gradi di libertà. L'espressione della C.D.F. diventa:

$$F(t) = \mathcal{P} \{ \tau \leq t \} = \frac{1}{2^{\nu/2} \Gamma(\nu/2)} \int_0^t x^{\nu/2-1} e^{-x/2} dx$$

### A.3.4 Normale

**p.d.f.**

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{t-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2}$$

**C.D.F.**

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{t-\mu}{\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

**hazard**

$$\frac{e^{-\left(\frac{t-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2}}{\sigma \left( \sqrt{2\pi} - \int_{-\infty}^{\frac{t-\mu}{\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right)}$$

**valor medio**

$$\mu$$

**varianza**

$$\sigma^2$$

**note** La funzione densità di probabilità è simmetrica rispetto a  $t = \mu$ . Integrali notevoli calcolati negli intervalli  $\mu \pm \sigma$ ,  $\mu \pm 2\sigma$  e  $\mu \pm 3\sigma$  valgono, rispettivamente, 0.683, 0.954, 0.997. Come è noto, se  $t$  è una variabile aleatoria con distribuzione normale, valor medio  $\mu$  e varianza  $\sigma^2$ , allora la variabile aleatoria  $z = (t - \mu)/\sigma$  è distribuita secondo la normale standard, di valor medio pari a 0 e varianza pari a 1:

$$N[0, 1](t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Inoltre, se  $\tau_1$  e  $\tau_2$  sono variabili aleatorie indipendenti, con distribuzione normale di parametri  $\mu_1, \sigma_1$  e  $\mu_2, \sigma_2$ , allora la variabile aleatoria  $t = \tau_1 + \tau_2$  ha una distribuzione normale con valor medio uguale a  $\mu_1 + \mu_2$  e varianza  $\sigma_1^2 + \sigma_2^2$ . Questo risultato si estende al caso di  $n$  variabili aleatorie con distribuzione normale, non necessariamente indipendenti fra loro.

### A.3.5 Lognormale

**p.d.f.**

$$\frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\ln(\lambda t)}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2}$$

**C.D.F.**

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln(\lambda t)}{\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

**hazard**

$$\frac{e^{-\left(\frac{\ln(\lambda t)}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2}}{t\sigma\left(\sqrt{2\pi} - \int_{-\infty}^{\frac{\ln(\lambda t)}{\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx\right)}$$

**valor medio**

$$\frac{e^{\frac{\sigma^2}{2}}}{\lambda}$$

**varianza**

$$\frac{e^{2\sigma^2} - e^{\sigma^2}}{\lambda^2}$$

**note** La funzione densità di probabilità lognormale, definita per  $t \in ]0, +\infty[$ , presenta l'importante proprietà di essere praticamente nulla all'origine, di alzarsi rapidamente al valore massimo per poi ridiscendere relativamente in fretta.

Per questo motivo la distribuzione lognormale è particolarmente adatta a descrivere tutte le attività che richiedono l'intervento umano ed in particolar modo la manutenzione. Per le proprietà dei logaritmi, infine, una variabile aleatoria  $t$  data dal prodotto di  $n$  variabili aleatorie con distribuzione lognormale, risulta anch'essa distribuita con una lognormale ( $\eta = \ln(t)$  ha distribuzione normale).

### A.3.6 Uniforme

Consideriamo una variabile aleatoria con distribuzione uniforme nell'intervallo  $[a, b]$ :

**p.d.f.**

$$\begin{cases} \frac{1}{b-a} & t \in [a, b] \\ 0 & t \notin [a, b] \end{cases}$$

**C.D.F.**

$$\begin{cases} 0 & t \leq a \\ \frac{t-a}{b-a} & t \in ]a, b] \\ 0 & t > b \end{cases}$$

**hazard**

$$\begin{cases} 0 & t < a \\ \frac{1}{b-t} & t \in [a, b[ \\ 0 & t \geq b \end{cases}$$

**valor medio**

$$\frac{a+b}{2}$$

**varianza**

$$\frac{(b-a)^2}{12}$$

**note** Particolarmente importante nella simulazione numerica è la distribuzione uniforme in  $[0, 1]$ .

### A.3.7 Binomiale

Consideriamo un esperimento di Bernoulli, caratterizzato dalla sola possibilità che si verifichi un evento  $\psi$  con probabilità  $p$ , o il suo complementare  $\bar{\psi}$  con probabilità  $(1-p)$ .<sup>3</sup> Per descrivere l'esperimento, è possibile utilizzare la variabile aleatoria  $\alpha$ , con  $\alpha = 1$  nel caso in cui si osservi l'evento  $\psi$  ed  $\alpha = 0$  altrimenti. In particolare, il valore atteso di  $\alpha$  sarà  $E[\alpha] = p$  e la varianza  $\text{Var}[\alpha] = E[\alpha^2] - E^2[\alpha] = p - p^2 = p(1-p)$ .

La variabile aleatoria  $\gamma = \sum_{i=1}^n \alpha_i$ , somma degli  $n$  esiti sperimentali  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  è distribuita come una Binomiale, la cui densità di probabilità è una funzione discreta del tipo:

$$f(k) = \mathcal{P}\{\gamma = k\} = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \quad k = 0, 1, \dots, n$$

La C.D.F. diventa la sommatoria seguente:

$$F(h) = \mathcal{P}\{\gamma \leq h\} = \sum_{k=0}^h f(k)$$

Il valor medio di  $\gamma$  è  $np$ , mentre la varianza vale  $np(1-p)$ .

---

<sup>3</sup>Il lancio di una moneta.

### A.3.8 Poisson

Per una variabile aleatoria e discreta  $\gamma$ , distribuita secondo una Poisson, valgono le seguenti espressioni:

**p.d.f.**

$$f(k) = \mathcal{P}\{\gamma = k\} = \frac{m^k}{k!} e^{-m} \quad k = 0, 1, \dots \quad m > 0 \quad (\text{A.2})$$

**C.D.F.** Come per tutte le distribuzioni di probabilità discrete si ha:

$$F(h) = \mathcal{P}\{\gamma \leq h\} = \sum_{k=0}^h f(k)$$

**valor medio**

$$m$$

**varianza**

$$m$$

**note** La distribuzione di Poisson viene generalmente utilizzata nei processi di rinnovo con eventi quali i tempi al guasto di componenti caratterizzati da una distribuzione esponenziale. La A.2, per  $m = \lambda t$ , esprime la probabilità di avere esattamente  $k$  guasti nell'intervallo  $[0, t]$ .

Nell'ulteriore ipotesi in cui  $n \rightarrow +\infty$ ,  $p \rightarrow 0$  e  $m = np$  è finito, la distribuzione di Poisson può essere utilizzata nel calcolo approssimato della distribuzione Binomiale.

### A.3.9 Geometrica

Nelle ipotesi dell'esperimento di Bernoulli, considerando una sequenza di osservazioni indipendenti  $\alpha_i$ , la variabile casuale  $\gamma$  che descrive il numero di esperimenti necessari per osservare per la prima volta l'uscita dell'evento  $\psi$ , è distribuita con la funzione densità di probabilità Geometrica seguente:

**p.d.f.**

$$f(k) = \mathcal{P}\{\gamma = k\} = p(1-p)^{k-1}$$

dove  $p$  è la probabilità che si verifichi l'evento  $\psi$  e  $(1-p)$  è la probabilità che si verifichi l'evento complementare  $\bar{\psi}$ .

**C.D.F.** Come per tutte le distribuzioni di probabilità discrete si ha:

$$F(h) = \mathcal{P}\{\gamma \leq h\} = \sum_{k=0}^h f(k) = 1 - (1-p)^h$$

**hazard**

$$p$$

**valor medio**

$$\frac{1}{p}$$

**varianza**

$$\frac{1-p}{p^2}$$

**note** La distribuzione Geometrica è la sola distribuzione di probabilità discreta che non tiene memoria del passato, come avviene nel caso continuo per la distribuzione esponenziale.

## Appendice B

# Generazione di variabili casuali

La generazione di variabili casuali può essere effettuata con varie tecniche, che dipendono naturalmente dal tipo di distribuzione da generare. Nelle sezioni che seguono si introducono i due metodi più interessanti per il caso della simulazione numerica applicata allo studio della manutenzione.

### B.1 Tecnica della trasformata inversa

Questa tecnica è utilissima nel caso in cui la variabile aleatoria  $X$  da generare sia continua, con C.D.F.  $F(X)$  monotona crescente. L'algoritmo per la generazione è banale:

1. Si estragga  $\zeta$  con distribuzione uniforme:  $\zeta \leftarrow \mathcal{U}|_{[0,1[}$
2.  $X = F^{-1}(\zeta)$

Si noti, che essendo  $F(X)$  monotona crescente, e  $\zeta \in [0, 1[$ , la  $F^{-1}(\zeta)$  è sempre ben definita.

La dimostrazione del metodo è ovvia per il caso della distribuzione  $\delta$  di Dirac. In questo caso, infatti, la cumulata è una funzione a gradino che raccoglie tutte le estrazioni  $\zeta$  e le inverte in corrispondenza di un unico valore  $X_0$ .

Una giustificazione intuitiva nel caso di distribuzione di probabilità generica può essere la seguente: più la  $F(X)$  è ripida e con più probabilità riesce a raccogliere le estrazioni casuali  $\zeta$  invertendole in un intervallo ristretto sull'asse delle  $X$ . Naturalmente la  $F(X)$  è tanto più ripida quanto più è alta la densità di probabilità  $f(X)$ , come era da aspettarsi. Di più si

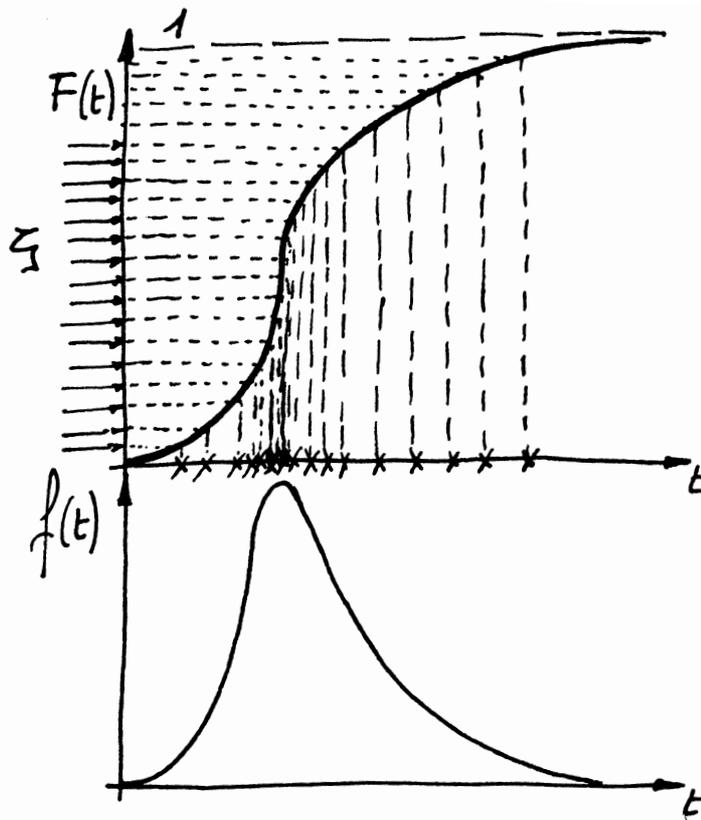


Figura B.1: Generazione di variabili aleatorie mediante inversione della cumulata

osservi che se la  $f(X)$  fosse nulla per un certo intervallo, la cumulata  $F(X)$  sarebbe totalmente piatta nello stesso intervallo, e pertanto non raccoglierebbe alcuna estrazione di  $\zeta$ . In figura B.1 si mostra una rappresentazione grafica del concetto sopra esposto. Si nota che le inversioni sulla cumulata (crocette) si addensano proprio dove la funzione densità è più elevata, come deve essere.

## B.2 Tecnica della reiezione

Il metodo della reiezione è meno diretto rispetto alla tecnica della trasformata inversa e può essere molto utile quando non esiste una forma comoda per la funzione inversa della  $F(X)$ .

Consideriamo la generazione di una variabile aleatoria  $X$  continua.<sup>1</sup> Supponiamo allora che  $X$  abbia funzione cumulata  $F(X)$  e funzione densità di probabilità  $f(X)$ ; vogliamo generare delle estrazioni casuali di  $X$  distribuite secondo la  $f$ . Il primo passo consiste nel trovare una funzione molto semplice  $t(X)$  che maggiora la  $f(X)$  su tutto il dominio,  $t(X) \geq f(X) \forall X$ . Naturalmente  $t(X)$  non sarà una densità di probabilità, in quanto si vede chiaramente che:

$$c = \int_{-\infty}^{+\infty} t(X) dx \geq \int_{-\infty}^{+\infty} f(X) dx = 1$$

però è anche immediato osservare che  $r(X) = t(X)/c$  è una funzione densità di probabilità.

A questo punto l'algoritmo di generazione di  $X$  diventa il seguente:

1. Si generi un'estrazione casuale della variabile aleatoria  $Y$  distribuita secondo la  $r(Y)$
2. Si estragga  $\zeta \leftarrow \mathcal{U}|_{[0,1]}$
3. Se  $\zeta \leq f(Y)/t(Y)$  allora l'estrazione della variabile aleatoria  $X$  è esattamente la  $Y$ , altrimenti si ritorni al punto 1

La giustificazione di questo interessante metodo è ancora una volta intuitiva: le estrazioni della variabile aleatoria  $Y$  si distribuiscono lungo una funzione che maggiora la  $f$  in tutti i punti. Si noti che la probabilità di accettare l'estrazione  $\zeta$  è esattamente il rapporto  $f(Y)/t(Y)$ . Questo significa che tutti i valori di  $Y$  vengono accettati nel caso in cui la  $t$  sia esattamente la  $f$ , come è ovvio. D'altra parte è anche ovvio che più la  $t$  si avvicina alla  $f$  e maggiore risulta la probabilità che le estrazioni della  $Y$  vengano accettate. Nelle zone in cui la  $t$  si discosta molto dalla  $f$ , invece, la probabilità di accettare i valori di  $Y$  è bassissima. Da queste considerazioni si vede che con tutta probabilità la  $X$  risulta distribuita secondo la funzione  $f$ .

---

<sup>1</sup>Il caso discreto è del tutto analogo.



# Bibliografia

- A. Birolini: *Reliability Engineering Theory and Practice*, Springer, Berlin 1999
- D. L. Snyder: *Random Point Processes*, J Wiley NY 1975
- W. A. Thompson: *Point Process Models with Applications to Safety and Reliability*, Chapman and Hall, NY 1988
- G.S. Fishman: *Monte Carlo Concepts, Algorithms, and Applications*, Springer Series in operations Research, NY 1996
- A. Dubi: *Monte Carlo Applications in Systems Engineering*, John Wiley & Sons, Chichester 2000
- Y. Ronen: *Handbook of Nuclear Reactors Calculations*, CRC press Boca Baton Florida, 1986, Volume II
- A.M. Law, W.D. Kelton: *Simulation Modeling and Analysis*, Mc Graw Hill International Edition, NY 1991
- L.F. Severance: *System Modeling and Simulation*, John Wiley, Chichester 2001
- MIL-STD-1629A: *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, USA DoD, Washington 1984
- D.C. Montgomery, G.C. Runger: *Applied Statistics and Probability*, John Wiley & Sons, NY 1994
- E.R. Ott, E.G. Shilling: *Process Quality Control troubleshooting and interpretation of data*, MCGraw-Hill, NY 1990
- J. Moubray: *Reliability Centred Maintenance RCM II*, Butterworth Heine-  
mann, Oxford 1997
- P.D.T. O'Connor: *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, NY 1989
- H. L. Resnikoff: *Mathematical Aspects of Reliability Centred Maintenance*, Dolby Access press, Los Altos 1978
- R. Sardella: *Proposta di una Metodologia per il Trattamento dell'Opinione degli Esperti negli Studi Probabilistici di Sicurezza degli Impianti Nucleari*, Tesi di dottorato in Ingegneria Nucleare, Università di Bologna, 1997
- G. Toomey, R. Pflasterer: *Reliability Centred Maintenance SRCM Program Giving Utilities A Competitive Edge*, Reliability, the magazine for improved plant reliability, vol 5 issue 4 pagg. 14-19, October 1998

G. Guerriero: *Manutenzione e verifiche di legge su macchine ed impianti*,  
EPC libri, Roma 2000