

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA

**DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DELLE MACCHINE
E DEI SISTEMI ENERGETICI**

- XX CICLO -

Settore Scientifico-Disciplinare: ING-IND/09

*Creazione e Sviluppo di un Sistema di Controllo in
Tempo Reale per un Sistema Fuel Cell*

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing. Davide Moro

Candidato:

Ing. Francesco Turoni

Coordinatore del Dottorato:

Chiar.mo Prof. Ing. Davide Moro

Esame Finale Anno 2008

PAROLE CHIAVE

FUEL CELL

MODEL BASED DESIGN

RAPID CONTROL PROTOTYPING

HARDWARE IN THE LOOP

SIMULINK

CONTROLLER

xPC TARGET BOX

“Alla mia famiglia”

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento non può che essere rivolto ai miei genitori e a mia sorella Monica. Grazie per essere stati sempre così presenti durante questi anni.

Ringrazio il mio relatore Prof.Ing. Davide Moro per la sempre costante fiducia e la grande disponibilità accordatami durante questo dottorato di ricerca.

Un sentito grazie è rivolto al Dr.Ing Michael Schreiber e al Dr.Ing. Michael Haug, datori di lavoro ed amici, che mi hanno suggerito e spronato ad affrontare questo percorso formativo straordinario.

Ein herzliches Dankeschön soll an meinen Arbeitgebern und Freunden Dr.Ing Micheal Schreiber und Dr.Ing Michael Haug gerichtet sein, die mir diese außergewöhnliche Laufbahn empfohlen und ermöglichen haben.

Grazie a tutti i miei colleghi con cui ho avuto modo di lavorare e confrontarmi costruttivamente in questi anni.

Ein Dankeschön an alle meinen Kollegen, mit denen ich die Möglichkeit gehabt habe, mich im Laufe dieser Jahre, zu konfrontieren und gemeinsam zu arbeiten.

Grazie agli amici tutti: italiani e quelli conosciuti in Germania.
Insieme a voi ogni momento od avventura intrapresa, anche quelli
meno facili, sono stati superati sempre con il sorriso.

Grazie ad Elisa. Chi più di te è riuscito ad aprirmi gli occhi, mi ha
spronato a fare meglio ed ha sempre creduto in me.

Francesco Turoni

Marzo 2008

SOMMARIO

INTRODUZIONE	13
1 STATO DELL'ARTE DEI SISTEMI FUEL CELL	15
2 CELLE A COMBUSTIBILE	19
2.1 Elementi Fondamentali	20
2.2 Classificazione	25
2.3 Impianto Reale	28
2.4 Produzione di Gas Idrogeno.....	29
2.4.1 Steam Reforming.....	31
2.5 Prestazioni.....	32
3 RAPID CONTROL PROTOTYPING	35
3.1 Model in the Loop.....	36
3.2 Esempi Pratici	38
3.2.1 Steam Reforming.....	38
3.2.2 Macchine a Stati	39
3.2.3 Verifica del Codice.....	40
3.3 Hardware in the Loop	41
3.4 Model Based Design.....	44

4	MODELLI MATEMATICI.....	45
4.1	Caso Studiato	47
4.2	Identificazione in Retroazione	50
4.2.1	Metodo Diretto	53
4.2.2	Metodo Indiretto	54
4.2.3	Metodo “Joint Input-Output”	56
4.2.4	Metodo a Due Stadi	57
5	SISTEMA DI CONTROLLO	59
5.1	Macchine a Stati.....	59
5.2	Controlli PI-AW	62
5.3	Controlli Fuzzy	64
5.3.1	Controlli Fuzzy Scalari.....	65
5.4	Ottimizzazione del Codice.....	69
5.5	Energy Manager.....	70
5.6	Field Test	72
6	CONCLUSIONI.....	77
	BIBLIOGRAFIA	81

INTRODUZIONE

Obiettivo della ricerca, basata su un progetto di natura commerciale, è lo sviluppo e la messa in opera di un sistema di controllo per un impianto fuel cell (celle a combustibile) ad uso domestico, in grado di fornire all'utente sia calore che potenza elettrica in condizioni stazionarie.

Il sistema fuel cell in questione è per il momento ancora in fase di sviluppo. I prototipi valutativi focalizzano l'attenzione all'analisi e alla determinazione dei vincoli tecnologici necessari alla messa in opera di un sistema standard per un utilizzo in larga scala.

Con lo sguardo rivolto all'ideazione di un dispositivo che non stravolga gli schemi impiantistici tuttora adottati in ambito civile, il sistema, il cui principale scopo è la produzione di calore (sottratto ai numerosi circuiti di raffreddamento) riceve in ingresso gas naturale, aria ed acqua.

Il sistema così introdotto è costruito in modo da essere capace, dal punto di vista elettrico, di sviluppare una potenza costante in funzione del grado di carico richiesto. L'ipotesi presuppone, naturalmente, un utilizzo in rete di tali sistemi in modo da essere in grado di ricevere (e fornire) la giusta quantità di potenza elettrica dalla (e alla) rete nelle più comuni e svariate condizioni di carico richieste dall'utente.

L'attuale stato dell'arte dei sistemi a celle a combustibile, soprattutto per quanto riguarda l'utilizzo di questi in ambito civile, precede la spiegazione dei

principi di funzionamento nonché delle varie componenti alla base di questi sistemi analizzando le reazioni che intercorrono tra anodo e catodo della cella, ed i principali metodi di produzione dell'idrogeno soprattutto soffermandomi sui dispositivi presenti nel sistema reale preso in esame.

La seconda parte della tesi riguarda invece, la spiegazione della metodologia adottata per il progetto e lo sviluppo del sistema di controllo vero e proprio con lo sguardo rivolto ai risultati ad oggi perseguiti.

1 STATO DELL'ARTE DEI SISTEMI FUEL CELL

In Europa, come in Giappone e negli Stati Uniti, numerose importanti industrie nonché enti scientifici stanno investendo risorse per lo sviluppo di sistemi energetici cogenerativi in ambito civile mediante l'utilizzo di celle a combustibile.

Alla fine degli anni ottanta parte in Germania un progetto sovvenzionato dal Governo Federale per lo sviluppo di tecnologie basate sull'utilizzo di celle a combustibile. Nella prima metà degli anni novanta ('94), sempre in Germania, viene intrapreso un progetto di ricerca per lo sviluppo di celle a combustibile ad elettrolita polimerico (PEMFC) e dal 2000 si ampliano le attività di ricerca riguardanti l'utilizzo di questa tecnologia per usi domestici [1].

In accordo con il Protocollo di Kyoto, i paesi ratificatori si sono fatti carico di ridurre le emissioni di CO_2 dell'8% tra il 1990 ed il 2012, e con i più recenti obiettivi suggeriti dall'Unione Europea durante il semestre di presidenza tedesca (2007), nei quali il valore è stato fissato al 20% entro il 2020 [2], vengono richiesti miglioramenti sempre maggiori nell'efficienza energetica per l'abbattimento delle emissioni inquinanti di gas ad effetto serra. Per raggiungere questi traguardi, una soluzione perseguibile, è sicuramente la cogenerazione in cui la produzione di elettricità viene combinata a quella di calore utile

raggiungendo un significativo incremento dell'efficienza termica con una corrispondente riduzione dell'emissioni inquinanti.

Per enfatizzare l'importanza di ricercare e collaudare soluzioni efficaci applicabili nel breve futuro, si può riportare il dato che, all'inizio del 2007, l'Unione Europea è riuscita a ridurre solo del 1,2% (rispetto all'8% accordato nel trattato) le emissioni di CO_2 [3].

Le celle a combustibile rappresentano un approccio differente alla normale conversione dell'energia. Come le batterie, infatti, le celle a combustibile producono energia elettrica elettrochimicamente ma, a differenza delle batterie, non hanno bisogno di ricarica in quanto producono potenza utile fino a quando viene loro fornito il combustibile.

Considerata da molti come la tecnologia chiave del ventunesimo secolo, tuttora ha ancora un enorme potenziale da sfruttare.

Il livello per l'attecchimento di questi sistemi come prodotto commerciale è stato stimato non superiore ai 1500 €/kW_{el} anche se ci si dovrebbe spingere fino a 1000 €/kW_{el} per essere considerati realmente competitivi con gli altri prodotti disponibili sul mercato [1].

Un altro fattore importantissimo per la riuscita di questi sistemi come prodotti commerciali, specialmente in applicazione stazionarie, risulta essere la vita delle varie componenti fondamentali che non dovrebbe posizionarsi al di sotto dei venti anni o più. Componenti come gli stack, che devono, ad oggi, essere sostituiti ogni 5-10 anni, devono quindi risultare reperibili a costi relativamente bassi ma soprattutto dovranno essere compatibili con le generazioni precedenti [4].

Diversi programmi industriali indicano il 2005 come data possibile per lo sviluppo di sistemi completi così come per le varie prove sul campo necessarie alla loro verifica in vista della produzione e commercializzazione in larga scala stimata possibile tra la fine del 2008 ed il 2010 [1].

Poiché l'idrogeno puro non è direttamente disponibile in natura, per lo sviluppo d'impianti cogenerativi stazionari, il combustibile di partenza maggiormente utilizzato è il gas naturale (CH_4).

Questi sistemi sono prevalentemente basati sul reforming del gas metano nelle sue diverse forme (gas naturale, gas illuminante, biogas, ecc...) in modo da non stravolgere gli schemi impiantistici tuttora adottati in ambito civile considerando che molte abitazioni possiedono già questi impianti di approvvigionamento.

Ad oggi l'aspetto maggiormente critico risulta essere il costo ancora troppo elevato soprattutto relazionato alle efficienze ancora troppo ridotte.

La teoria ci dice infatti che le efficienze elettriche sperate per questi tipi di sistemi si dovrebbero aggirare attorno al 40% mentre, ad oggi, i sistemi in attuale sviluppo raggiungono valori attestati attorno al 30% [1].

I principali vantaggi che spingono a continuare la ricerca sull'utilizzo di sistemi energetici per abitazioni sfruttando le celle a combustibile sono le ridottissime emissioni di sostanze inquinanti, la possibilità di produrre sistemi con bassissimi livelli di emissioni acustiche e l'utilizzo di vettori energetici ad alta efficienza data la capacità di supportare ogni tipo di potenza elettrica. Si parte, infatti, dai Watt per il loro utilizzo con elettrodomestici (soprattutto nell'ambito dell'elettronica portatile: telefoni cellulari, computer portatili, ecc.), per passare ai kilowatt per sistemi domestici di conversione dell'energia o per sistemi sfruttati in campo automobilistico fino ad arrivare ai Megawatt pensati per l'utilizzo in centrali elettriche.

2 *CELLE A COMBUSTIBILE*

Il principio alla base delle celle a combustibile è molto semplice: la reazione inversa dell'elettrolisi dell'acqua.

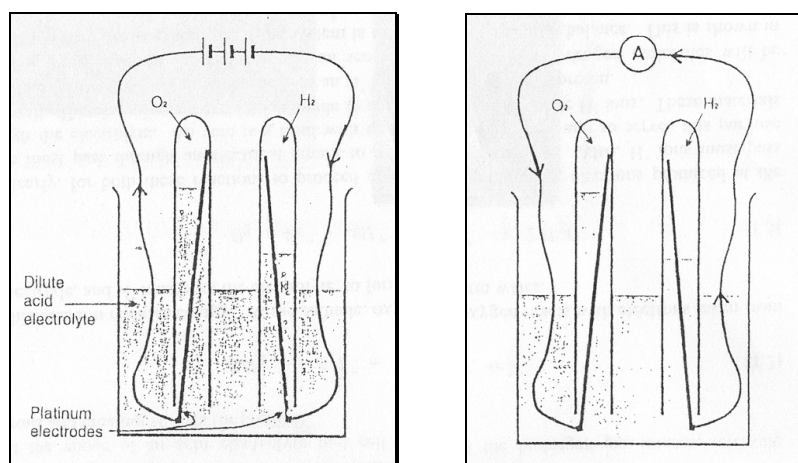
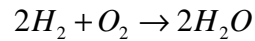


Figura 1: Prima figura: elettrolisi dell'acqua. L'acqua viene separata in idrogeno ed ossigeno al passaggio di una corrente elettrica. Seconda figura: il flusso di corrente nella ricombinazione dell'ossigeno con l'idrogeno [5].

La corrente elettrica così come il calore sono generati attraverso la ricombinazione dell'idrogeno e dell'ossigeno nel catodo della cella.



In generale, le reazioni elettrochimiche che intercorrono tra anodo e catodo della cella sono differenti a seconda del tipo di cella a combustibile considerata, anche se ci si trova sempre di fronte ad un flusso di ioni trasferiti da anodo a catodo tramite l'elettrolita ed il corrispondente flusso di elettroni attraverso gli elettrodi del circuito elettrico esterno. Il risultato globale è una ossidazione di combustibile avvenuta senza un vero processo di combustione.

2.1 ELEMENTI FONDAMENTALI

L'*anodo*, la parte negativa della cella a combustibile, conduce gli elettroni verso un circuito elettrico esterno. Al suo interno ha canali studiati in modo da disperdere equamente l'idrogeno sull'intera superficie del catalizzatore.

Nel *catodo*, la parte positiva della cella, l'ossigeno è distribuito sulla superficie del catalizzatore. Il catodo richiama gli elettroni dal circuito esterno al catalizzatore dove si ricombinano con gli ioni d'idrogeno ed ossigeno per formare acqua.

L'*elettrolita* permette la sola conduzione degli ioni caricati positivamente tra anodo e catodo e blocca il passaggio agli elettroni.

Il *catalizzatore* è composto da un materiale speciale in grado di ridurre l'energia di attivazione per la reazione che intercorre tra ossigeno ed idrogeno. Il catalizzatore, che riveste le facce dell'elettrolita, è costituito da un materiale poroso di modo da permettere la massima superficie di contatto tra idrogeno ed ossigeno.

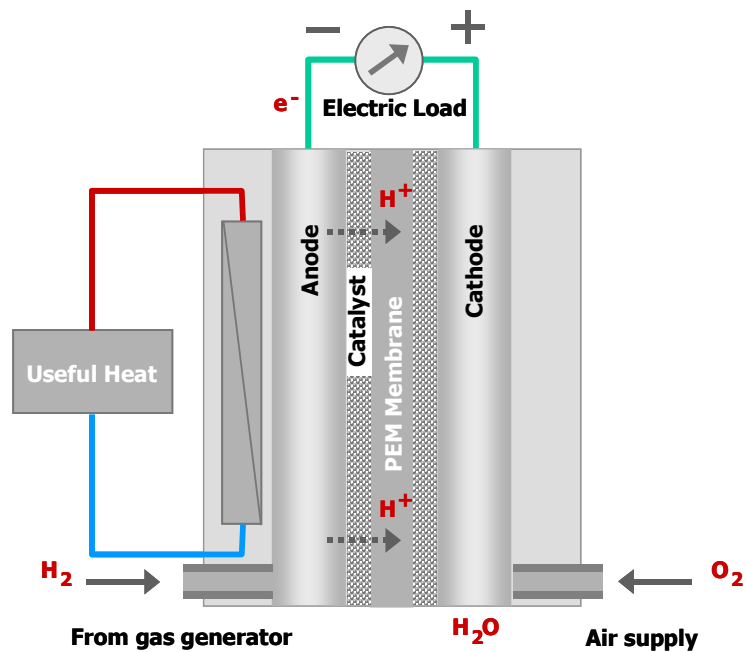


Figura 2: Parti di una cella a combustibile PEM [1].

Sul mercato esistono diverse tecnologie adottate dalle compagnie produttrici sia per quanto concerne l'elettrolita che i piatti bipolari ed i catalizzatori. Queste tecnologie sono normalmente combinate e testate dalle aziende produttrici di sistemi che utilizzano celle a combustibile per trovare la soluzione migliore che soddisfi le proprie specifiche tecniche.

In generale le celle a combustibile a membrana polimerica (PEMFC) utilizzano fluoretilene come elettrolita. Questo permette la migrazione degli ioni di idrogeno ma impedisce il passaggio degli elettroni.

Il prodotto più conosciuto, come pure il più utilizzato, è sicuramente il Nafion[®] (marchio registrato dalla Dupont) che è stato sviluppato in diverse varianti già dagli anni '60 e da allora è diventato uno standard industriale.

Questo materiale ha ricoperto un ruolo importantissimo nello sviluppo delle celle a combustibile PEMFC. I forti legami tra il carbonio ed il fluoro lo rendono

particolarmente resistente e stabile agli attacchi chimici sia in ambienti ossidanti che riducenti.

Un altro vantaggio è dato dalla conduttività protonica che raggiunge valori elevati anche a temperature relativamente basse come quelle di operatività della cella. La sua conducibilità protonica è funzione del suo stato idrato. In condizioni di limitata idratazione il materiale si presenta come uno scarso conduttore ionico e la sua conduttività aumenta bruscamente con l'aumento del contenuto dell'acqua.

Il fenomeno sopra descritto è funzione della struttura particolare del Nafion[®]. Quando la membrana è idratata, gli ioni SO_3^- legano le molecole d'acqua. Gli ioni idrogeno H^+ acquistano mobilità legandosi alle molecole d'acqua, tramite legami idrogeno e muovendosi tra i siti solfonici della membrana.

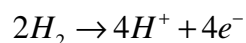
Per questo motivo, la membrana, opportunamente idratata, è un eccellente conduttore di ioni di idrogeno H^+ . Questi, come sopra accennato, migrano all'interno della cella dall'anodo verso il catodo in un'unica direzione senza permettere il passaggio degli elettroni.

Per questo, come si può osservare in molti sistemi reali e in quello preso in esame, i gas reagenti sono umidificati prima di essere introdotti nella cella.

Di contro, gli svantaggi sono dati dal costo molto elevato e dalla degradazione delle sue proprietà alle alte temperature.

Alla luce di questi svantaggi, sono stati studiati e progettati altri materiali meno costosi, puntando gli sforzi sull'ottimizzazione delle proprietà meccaniche così da aumentarne la durata nel tempo.

Quando una molecola di idrogeno H_2 viene a contatto con il catalizzatore si separa in due ioni H^+ e due elettroni e^- . Gli elettroni così generati nell'anodo sono condotti attraverso il circuito elettrico esterno verso il catodo producendo lavoro utile.



Nel catodo, e sempre attraverso il catalizzatore, le molecole di ossigeno O_2 si dissociano in due atomi di ossigeno con una elevata carica negativa. Questa carica negativa attrae i due ioni H^+ attraverso l'elettrolita che si ricombinano con l'ossigeno e con due elettroni, provenienti dal circuito elettrico esterno, per formare una molecola d'acqua H_2O .



Anche se come detto viene sviluppata energia, l'energia di attivazione per la reazione esotermica deve essere comunque tenuta in considerazione come fattore che rallenta i tempi di reazione.

L'aumento dell'area degli elettrodi risulta essere uno dei più comuni metodi per sopperire a questo lento rapporto, visto che risulta essere direttamente proporzionale alla superficie dell'elettrodo. Per la relazione appena descritta, la superficie dell'elettrodo costituisce un importante aspetto nel progetto di una cella a combustibile.

In una singola cella, infatti, le reazioni sopra descritte, producono una differenza di tensione non superiore a 0,7 V [5]. Per aumentare questo valore fino a livelli utili, più celle (elemento fondamentale) sono combinate insieme a formare uno stack (*Figura 3*). Sempre per sopperire al problema della bassa potenza prodotta, e analizzando la corrente elettrica come funzione dell'area che intercorre tra il gas, l'elettrodo, l'elettrolita e la distanza tra gli elettrodi, le celle sono generalmente studiate e prodotte piatte.



Figura 3: PEM Fuel Cell stack (per gentile concessione della EUtech Scientific Engineering GmbH).

Una prima metodologia per collegare le celle consiste nel connettere gli spigoli di ogni anodo con il catodo della cella successiva. Una soluzione alternativa, e sicuramente la più utilizzata, consiste invece nell'utilizzo di piatti bipolari dove ogni singolo piatto connette un catodo con l'anodo della cella successiva.

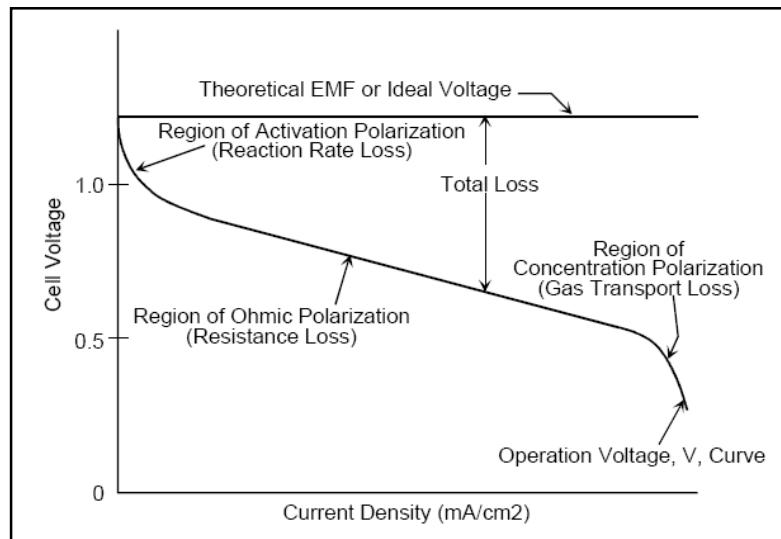


Figura 4: Caratteristica ideale e reale di tensione e corrente in una Fuel Cell [6].

Le caratteristiche generali di uno stack di celle a combustibile sono bene descritte grazie all'aiuto della curva di polarizzazione.

Dettagli riguardanti la polarizzazione possono essere trovati in [7]. Generalmente l'obiettivo primario risulta essere quello di far funzionare lo stack vicino alla sua massima potenza, corrispondente quindi al suo punto di instabilità. Per questo motivo, il processo, come anche tutte le sue componenti, devono essere controllate in ristretti limiti di funzionamento.

Scopo principale di questo progetto è stato appunto lo sviluppo completo del sistema di controllo sia per quanto riguarda il software che per quanto riguarda l'hardware che permettesse di raggiungere questi ristretti limiti.

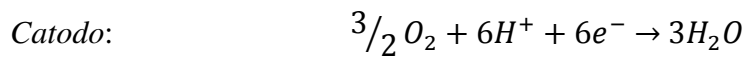
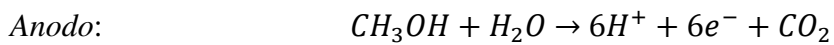
2.2 CLASSIFICAZIONE

In letteratura si possono trovare diversi criteri per suddividere i vari tipi di celle a combustibile a seconda che si vogliano identificare in base ai livelli di potenza elettrica prodotta o alle loro temperature di utilizzo. Nel primo caso, partendo dalle piccole potenze, si avranno le *DMFC* (celle a metanolo diretto, $<1kW$), *AFC* (celle alcaline, $5\div150kW$), *PEMFC* (celle ad elettrolita polimerico, $1\div500kW$), *PAFC* (celle ad acido fosforico, $50kW\div1MW$), *SOFC* (celle ad ossidi solidi, $50kW\div1MW$) e le *MCFC* (celle a carbonati fusi, $100kW\div3MW$); mentre nel secondo caso, si avranno le *AFC* ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$), le *DMFC* ($50\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$) e le *PEMFC* ($70\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$) per basse temperature di utilizzo, e le rimanenti *PAFC* (ca. $220\text{ }^{\circ}\text{C}$), *MCFC* ($650\text{ }^{\circ}\text{C}$) e *SOFC* ($800\text{-}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) per livelli di temperature medio alte.

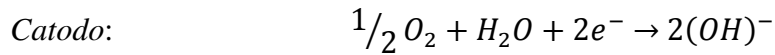
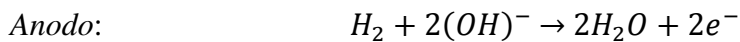
Naturalmente le caratteristiche ideali delle celle a combustibile dipendono dalle reazioni elettrochimiche che intercorrono al loro interno tra l'ossigeno ed i diversi carburanti utilizzati.

Qui di seguito sono riportate le varie reazioni che avvengono tra anodo e catodo secondo il tipo di cella a combustibile considerata.

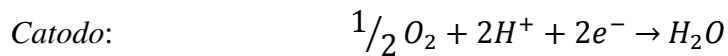
DMFC



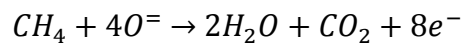
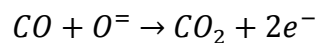
AFC



PEMFC/PAFC

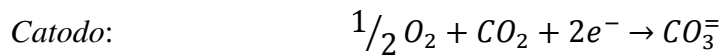
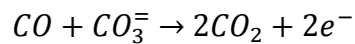
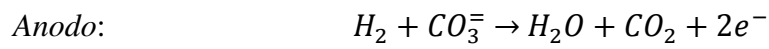


SOFC





MCFC



Nel dettaglio, le celle a combustibile utilizzate per applicazioni cogenerative stazionarie in ambito civile sono principalmente del tipo PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) soprattutto grazie alle loro temperature di utilizzo relativamente basse. Queste celle vedono la loro prima apparizione negli anni sessanta negli Stati Uniti per l'utilizzo in applicazioni aerospaziali. Il primo progetto è infatti attribuito alla General Electric per conto della Agenzia spaziale americana NASA.

Come già introdotto, le celle a combustibile a membrana polimerica (PEMFC) hanno bisogno d'idrogeno per funzionare. Questo può essere utilizzato direttamente tramite l'adozione di serbatoi sottopressione o realizzato attraverso una serie di dispositivi (reattori, scambiatori di calore, ecc ...) che ne permettono la sua produzione partendo da altre fonti primarie come, nello specifico di questo progetto, il gas metano.

2.3 IMPIANTO REALE

Nella stragrande maggioranza dei casi, come in quello qui presentato, i sistemi cogenerativi che utilizzano le celle a combustibile per uso stazionario in ambito civile sono forniti direttamente di un sistema di generazione di gas idrogeno.

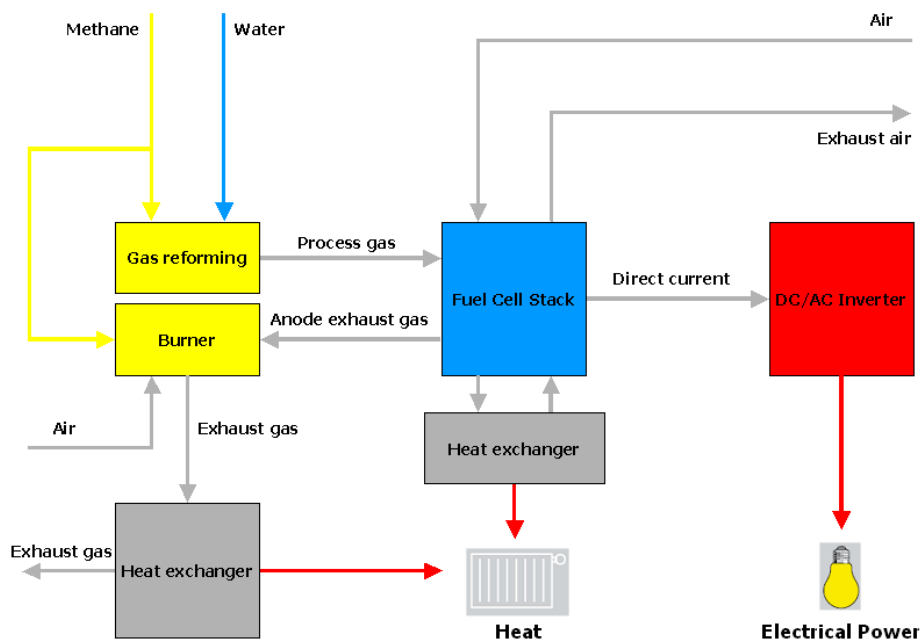


Figura 5: Schema di un impianto ad uso domestico con celle a combustibile PEM per la produzione di potenza elettrica e termica [1].

Partendo da un processo di reforming del gas naturale, il gas prodotto, per la maggior parte composto d'idrogeno, deve essere purificato attraverso l'uso di altri reattori come un Single-shift ed un Methanizer di modo che all'ingresso dell'anodo della cella il gas consista principalmente di idrogeno (H_2), anidride carbonica (CO_2), acqua (H_2O) e tracce di monossido di carbonio (CO) sotto ai 50 ppm. Questo ultimo valore, in particolare, risulta essere molto importante

visto che concentrazioni maggiori di monossido di carbonio (CO) risulterebbero dannose per il catalizzatore riducendone drasticamente la sua vita operativa.

Questi sistemi possono essere quindi schematizzati secondo le seguenti componenti principali esemplificate nello schema di *Figura 5*: il processo per la produzione di gas idrogeno, lo stack di celle a combustibile ed un inverter per la trasformazione della corrente da continua (ai capi dello stack) ad alternata (alla rete).

2.4 PRODUZIONE DI GAS IDROGENO

Anche se esistono molti metodi di reforming, i tre processi commercialmente più sviluppati sono:

- *steam reforming*
- *partial oxidation reforming*
- *autothermal reforming*

Lo steam reforming è sicuramente il metodo più adottato per convertire idrocarburi leggeri in idrogeno. Il combustibile, scaldato e vaporizzato, è iniettato nel corrispondente reattore insieme a vapor d'acqua. Un parametro molto importante da tenere in considerazione per quanto concerne la capacità sia di portare a compimento la reazione come pure di inibire la formazione di fuliggine è il rapporto molare tra il vapor d'acqua e il carbonio (steam-to-carbon ratio – S/C). Nel caso studiato, questo parametro si attesta a valori pari circa a 3.

Il processo di steam reforming è normalmente eseguito utilizzando un catalizzatore a base di nichel. Altri metalli nobili, come ad esempio il cobalto, possono essere utilizzati anche se, naturalmente, hanno una maggiore incidenza economica.

Oltre alla reazione di steam reforming, all'interno dello stesso reattore ha luogo una reazione di water-gas shift. Le due reazioni combinate insieme danno luogo ad un sistema comunque di tipo endotermico. Per questo, le reazioni sono favorite da alte temperature raggiunte normalmente grazie l'ausilio di bruciatori ausiliari. L'utilizzo di calore sottratto ad altre parti dell'impianto ne può migliorare certamente l'efficienza.

L'ossidazione parziale, come dice la parola stessa, è l'incompleta combustione di un combustibile grazie all'iniezione di una porzione d'aria inferiore a quella stechiometrica. L'introduzione del vapor d'acqua, in questo stadio, promuove le reazioni sopra citate di steam reforming e water-gas shift. Il processo è fortemente esotermico generando così alte temperature. Per questo, di norma, si utilizzano dei catalizzatori per ridurre sostanzialmente le temperature di modo da permettere l'utilizzo di materiali più comuni (ad esempio l'acciaio) per la costruzione dei reattori.

Vista la non necessaria presenza di una fonte di calore esterna, il processo di ossidazione parziale risulta più compatto rispetto a quello di steam reforming.

L'ultimo metodo citato non è altro che la combinazione dei primi due. La reazione di steam reforming assorbe parte del calore rilasciato dall'ossidazione parziale limitando così le temperature massime nel reattore. Anche in questo caso si parla, anche se solo lievemente, di un sistema esotermico.

Lo steam reforming, già impiegato in sistemi a celle a combustibile per applicazioni stazionarie, permette di ottenere un'alta concentrazione di idrogeno dai gas riformati, ha alte efficienze di conversione e costi di componenti minori rispetto agli altri metodi. L'ossidazione parziale, a parità di combustibile, è più flessibile con tempi di avviamento più bassi ed ha una maggiore capacità di

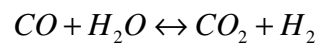
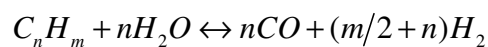
rispondere in tempi brevi alle variazioni di carico avendo la peculiarità di essere in grado di utilizzare una gamma più ampia di combustibili.

A seconda delle applicazioni, del combustibile a disposizione per la conversione, dell'ingombro fisico del meccanismo e di altre numerose condizioni ognuno di questi sistemi presenta caratteristiche più o meno positive.

2.4.1 STEAM REFORMING

Lo steam reforming, come già accennato, è il metodo di conversione di idrocarburi in idrogeno più sviluppato attualmente e presente nel sistema studiato. Consiste nella conversione chimica degli idrocarburi in presenza di vapore acqueo per produrre una miscela di gas ad alta concentrazione di idrogeno.

Delle svariate reazioni che si svolgono all'interno del reattore le due principali, nonché le più significative, sono la reazione detta di steam reforming e quella di water-gas shift:



La prima è fortemente endotermica e, per avvenire, richiede un abbondante contributo energetico (per il metano, ad esempio, è di $\Delta H = 206,28 \text{ kJ/mol}$); presenta una bassa velocità di reazione e per questo motivo l'intero processo è dinamicamente lento all'avvio e nel transitorio.

La seconda è esotermica, caratterizzata da una lieve produzione di calore ($\Delta H = -41,16 \text{ kJ/mol}$).

Nel complesso la combinazione delle due si presenta come un sistema endotermico tale da dover ricorrere ad una fonte di calore esterna. Questa è fornita, nella maggior parte dei casi, da uno scambiatore di calore posto nei pressi del reattore. Nel caso reale preso in esame risulta essere un bruciatore che utilizza lo stesso gas naturale in ingresso al processo come anche il gas riformato ad alto potenziale non utilizzato in uscita dalla cella a combustibile.

La reazione di water-gas shift è utile oltre che per contribuire alla produzione di idrogeno anche per abbassare il contenuto di monossido di carbonio (CO) presente nel gas. Molto spesso, però, come nel caso del sistema considerato, la diminuzione non è sufficiente per le richieste del catalizzatore e risulta indispensabile aggiungere a valle altri dispositivi che ne diminuiscano ulteriormente il contenuto (methanaizer).

Il monossido di carbonio si comporta da vero e proprio veleno legandosi fortemente con il catalizzatore riducendone i siti disponibili per l'assorbimento dell'idrogeno e per l'elettro-ossidazione (per il platino, ad esempio, a temperature inferiori di $150 \text{ }^\circ\text{C}$).

2.5 PRESTAZIONI

Come già accennato nell'introduzione, un aspetto molto importante che deve essere preso in considerazione per lo studio e l'analisi di sistemi cogenerativi di questo tipo è sicuramente l'efficienza. Questa è fornita grazie all'utilizzo di parametri come il rendimento termico ed elettrico dell'impianto.

In un impianto per la conversione dell'energia, l'efficienza è definita come il rapporto tra la potenza (termica od elettrica utile) rispetto alla potenza introdotta nell'impianto stesso.

In questo caso, i due rendimenti sono definiti considerando lo schema di *Figura 6*.

La potenza termica utile sarà data dalla portata d'acqua circolante nell'impianto secondario (di riscaldamento) moltiplicato per il suo calore specifico e la differenza di temperatura tra l'ingresso (uscita dal sistema di celle a combustibile) e l'uscita (entrata al sistema di celle a combustibile) di questa dal circuito di riscaldamento.

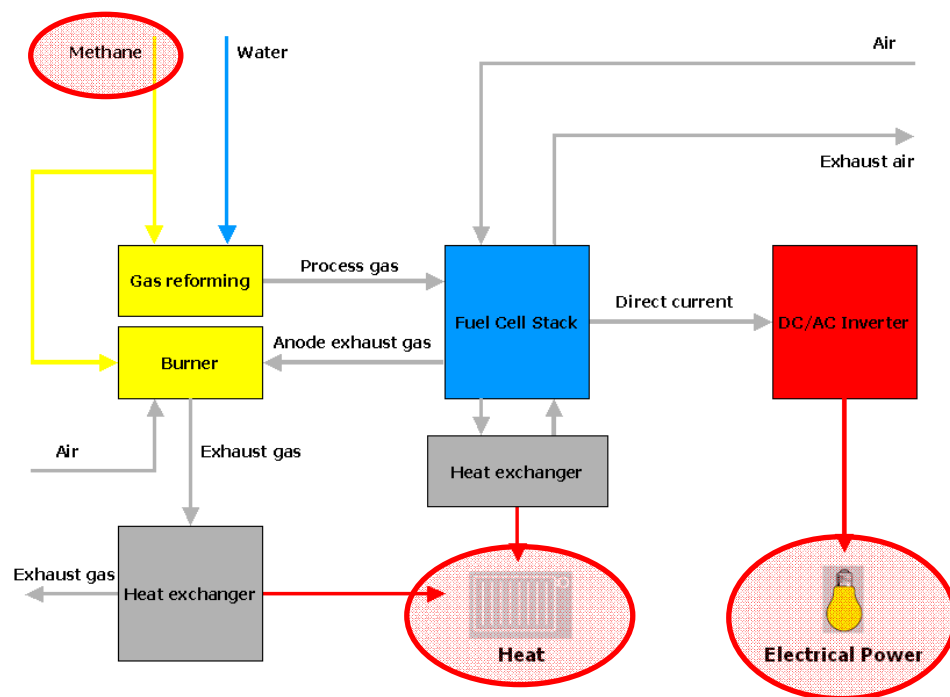


Figura 6: Schema di un impianto a celle a combustibile con in evidenza le potenze termiche ed elettriche in gioco.

La potenza termica introdotta nell'impianto non sarà altro che la portata di gas naturale (combustibile) utilizzato per la formazione dell'idrogeno sia in

ingresso al bruciatore che direttamente utilizzato per la formazione di gas idrogeno.

Queste due potenze formano il rendimento termodinamico dell'impianto secondo la nota relazione:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{H_2O} \cdot C_p \cdot \Delta T}{\dot{m}_{fuel} \cdot LHV}$$

Per quanto riguarda la potenza elettrica utile, questa sarà calcolata come differenza tra la potenza elettrica in uscita dell'inverter e la potenza elettrica utilizzata dalle varie componenti dell'impianto (valvole automatiche, riscaldatori elettrici, ecc ...).

Il rendimento sarà quindi calcolato utilizzando la seguente relazione:

$$\eta_{el} = \frac{P_{AC} - P_{AC_loss}}{\dot{m}_{fuel} \cdot LHV}$$

Un altro parametro importante che può essere considerato per comparare impianti di questo tipo è l'exergia¹. Questa non è altro che una funzione di stato utilizzata in campo ingegneristico per indicare la quantità di energia utilizzata in una trasformazione.

¹ Il termine *exergia* è stato coniato nel 1956 dall'ingegnere sloveno Zoran Rant, anche se il concetto era stato in precedenza sviluppato dal fisico americano J. Willard Gibbs già alla fine del secolo precedente (1873). Z. Rant introdusse anche il concetto di *anergia*, parte complementare dell'energia che non può essere più convertita in lavoro.

3 RAPID CONTROL PROTOTYPING

Moderni metodi per lo sviluppo di sistemi di controllo si basano fortemente sulla modellazione, la simulazione e gli esperimenti effettuati in tempo reale sia per quanto riguarda il sistema di controllo e il processo fisico.

Tecniche come il Rapid Control Prototyping (Model in the Loop e Software in the Loop) e l'Hardware in the Loop [8] sono stadi consecutivi che, partendo dalle idee alla base del sistema di controllo, permettono, in conclusione, di collegare e calibrare il sistema di controllo con il sistema reale attraverso l'uso di un target hardware; niente di più di un PC industriale nel quale possono essere scelte differenti configurazioni per quanto riguarda il trasferimento dei segnali e nel quale viene congelato il codice sviluppato.

Considerando preferibile progettare e sviluppare il completo sistema di controllo come pure la simulazione del processo fisico utilizzando il medesimo ambiente di sviluppo software, la scelta è ricaduta sul prodotto Matlab/Simulink. Tale piattaforma, attraverso l'utilizzo di diverse sue toolbox, permette infatti la modellazione, la simulazione come pure il completo sviluppo e l'ottimizzazione di sistemi di controllo automatici.

Si è quindi scelta la toolbox grafica Simulink per sviluppare una collezione di moduli elementari da utilizzare sia nello sviluppo del sistema di controllo quanto

nella modellazione del processo fisico. Attraverso l'utilizzo di questa libreria e semplicemente selezionando e collegando i diversi blocchi elementari tra loro si è man mano andata creando la complessa struttura desiderata [9].

Utilizzando questo approccio si è fatto in modo che le varie componenti del sistema reale avessero una corrispondenza anche visiva nel modello. Questo ha permesso quindi di rendere più intuitivo non solo lo schema dell'impianto, ma anche e soprattutto le catene in retroazione alla base dei vari controlli.

Tale vantaggio o semplificazione non deve essere sicuramente trascurato vista la complessità e l'elevato numero di componenti da controllare all'interno di un impianto come quello preso in esame.

Ricordando che la programmazione del codice di controllo è stata sviluppata in parallelo con la costruzione del processo fisico, l'introduzione e la scelta di un approccio di questo tipo (modulare) ha permesso, senza grosse difficoltà, di intervenire anche a fronte di adattamenti/cambiamenti avvenuti in itinere. In questi frangenti è bastato introdurre, sostituire od eliminare una o più componenti nel modello del processo e di pari passo nel codice di controllo senza per questo stravolgere completamente la loro struttura di base.

3.1 MODEL IN THE LOOP

Il progetto ha visto nel Model in the Loop (simulazione sia del sistema di controllo che del processo) uno dei momenti più importanti dello sviluppo del codice di controllo. Naturalmente, però, è necessario sottolineare come ogni stadio sia assestante e indispensabile per la buona riuscita di tutti gli obiettivi che devono essere considerati all'interno di un progetto di natura commerciale come questo.

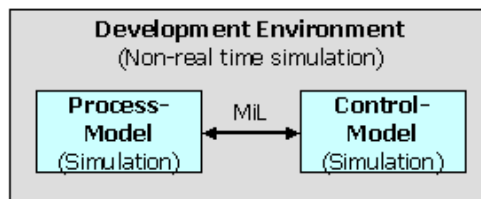


Figura 7: Simulazione MiL come parte del Rapid Control Prototyping [8].

Durante questa fase lo scopo principale è quello di progettare e sperimentare il sistema di controllo in tutte le sue parti senza alcun rischio per quanto riguarda il prototipo da sviluppare. Un grosso vantaggio che un approccio di questo tipo fornisce è sicuramente la possibilità di simulare e verificare il codice sia nelle condizioni di utilizzo nominali che in condizioni di pericolo o non possibili da raggiungere con il sistema reale pena il suo danneggiamento.

Questa fase permette quindi di simulare e verificare l'intero codice di controllo come pure sue singole parti durante i transitori di avviamento o di spegnimento dell'impianto, le normali fasi di produzione a diversi regimi di carico come pure verificare le procedure di emergenza.

Da qui, visto che il codice di controllo lavora insieme alla simulazione, i vari controlli in catena chiusa (come pure quelli in catena aperta) ma anche gli algoritmi che coordinano globalmente i vari controlli all'interno del codice (macchine a stati) possono essere facilmente testati e verificati anche in condizioni limite di utilizzo che in molti casi sarebbero difficili o impossibili da raggiungere con il sistema reale.

3.2 ESEMPI PRATICI

Questi vantaggi possono essere chiariti e compresi meglio introducendo degli esempi pratici. Consideriamo ad esempio la complessità del sistema che si sta prendendo in esame ricordando come, in svariati casi, non si possa parlare di una completa indipendenza delle varie sue componenti.

3.2.1 STEAM REFORMING

Nel caso del sottosistema generatore di gas, infatti, il reattore addetto allo *steam reforming*, i cui ingressi in caso stazionario, sono le portate di vapore d'acqua, di gas naturale e la potenza termica fornita dal bruciatore per far avvenire la reazione di *reforming*, non può essere testato, all'interno del sistema reale, a temperature troppo elevate.

Queste condizioni non possono e non devono essere raggiunte dal reattore sia per quanto riguarda gli elevati stress termici che i materiali dovrebbero sopportare sia perché nell'impianto, così come costruito, lo *steam reformer* è immediatamente seguito dal reattore per la reazione di *single shift*.

Quest'ultima reazione è di tipo esotermico ed è in grado di essere effettuata in un ambiente che presenti una temperatura attorno ai 240 °C grazie al catalizzatore utilizzato al suo interno. Qualora si raggiungessero nello *steam reformer* delle temperature troppo elevate (ad esempio superiori a circa 700 °C), al suo interno il flusso di gas riformato potrebbe giungere allo *shift* con un gradiente termico ancora troppo elevato rischiando di danneggiarne il catalizzatore.

3.2.2 MACCHINE A STATI

Un altro esempio ci è fornito dalla verifica delle macchine a stati. Per la loro complessità, a volte, oltre ad essere indispensabili verifiche separate dei singoli algoritmi, è anche necessario sperimentare il loro comportamento nel contesto generale e vedere, specialmente nei casi di emergenza, se le contromisure previste funzionano come dovrebbero. Per fare questo, in svariati casi, si raggiungerebbero delle condizioni limite tali da provocare il sicuro danneggiamento del sistema o di alcune sue parti.

Sempre in questa fase è possibile anche sperimentare e valutare approcci di controllo differenti. Ad esempio, giacché è presente un modello del processo, si potrebbe ricorrere, in alcuni casi, anche a controlli di tipo predittivo (MPC).

Un grosso vantaggio è quindi dato dalla modularità. Si può così sostituire, aggiungere od eliminare una o più componenti ed allo stesso tempo verificare l'intero codice di controllo a fronte di una simulazione del processo traendone solo i vantaggi.

L'altro grande vantaggio risulta essere di natura prettamente economica. Durante la fase del Model in the Loop gli esperimenti sono eseguiti in un ambiente adito alla simulazione (non real time) in cui la velocità di esecuzione dell'applicazione è enormemente maggiore di quella reale. Il chiaro vantaggio è la facile ripetibilità degli esperimenti a costi relativamente bassi rispetto a quelli che si dovrebbero sostenere per portare a termine le medesime prove utilizzando il processo reale.

Si consideri, sempre a fronte di esempio, che le fasi di avviamento, fino al raggiungimento dei regimi nominali di utilizzo, e di spegnimento del sistema reale si attestano nel campo delle ore. La stessa procedura, ma in questo caso utilizzando la simulazione con il Model in the Loop, richiede solo pochi minuti

od addirittura secondi se si parametrizzassero le varie componenti (processo) con guadagni d'anello maggiori.

Quest'ultima opzione è da tenere sicuramente in grossa considerazione quando dal Model in the Loop si passa alla fase di verifica in Hardware in the Loop. Come si vedrà più dettagliatamente in seguito, questa fase vede come uno degli aspetti principali il fatto di eseguire simulazioni in tempo reale.

La possibilità, quindi, di avere un modello più “veloce” di quello reale è, per alcuni tipi di test, sicuramente molto importante dal punto di vista del risparmio di tempo e di conseguenza economico necessario al compimento delle suddette verifiche.

3.2.3 VERIFICA DEL CODICE

Per questo, un aspetto molto importante da rilevare è dato dalla possibilità di sviluppare facilmente, sempre durante questa fase, algoritmi con sequenze di test “*ad hoc*” da poter sfruttare anche nel caso di verifiche automatiche e automatizzate del codice o di sue parti.

Con il termine verifica si intende il processo che permette di determinare se un prodotto soddisfi propriamente le sue specifiche. La fase di verifica è quindi importante sia perché facilita la manutenzione del prodotto sia perché permette di raggiungere le scadenze stabilite in fase di progetto. Dall'altro canto è importante sottolineare come un'eccessiva verifica possa risultare controproducente come il suo contrario (la scarsa verifica) per via dell'eccessivo sforzo profuso.

La verifica può essere di tipo statico, dinamico, manuale o automatico. Una strategia ottimale, naturalmente, deve utilizzare una commistione delle diverse tecniche sopra citate.

Il grande vantaggio, quindi, degli algoritmi sviluppati durante la fase del Model in the Loop è quello di poter essere programmati ed utilizzati in contemporanea con il codice, e quindi in modo molto semplice ed intuitivo.

Naturalmente, seguendo questo tipo di approccio, l'algoritmo di verifica è sviluppato subito dopo od addirittura in contemporanea con quello che deve essere implementato con il vantaggio che il programmatore ha ancora fresche tutte le specifiche e le condizioni al contorno che devono essere soddisfatte.

Questi codici possono essere anche riutilizzati in fasi successive, come ad esempio in ambienti *real time* (simulazioni in tempo reale), dove certamente codici non ottimizzati oppure sequenze manuali di verifica sbagliate eseguite direttamente dall'operatore possono far perdere tempi decisamente rilevanti al fine del buon successo di un progetto.

L'incidenza economica fino a qui sostenuta sarà dovuta infatti principalmente allo sviluppo dei modelli di controllo quanto del processo.

3.3 HARDWARE IN THE LOOP

Dopo questa fase il prototipo del sistema di controllo ottenuto tramite le simulazioni in MiL è pronto per essere testato con simulazioni HiL. Questa fase (simulazioni in tempo reale) permette di verificare il sistema di controllo in condizioni nominali di utilizzo così come in condizioni di emergenza utilizzando gli ingressi ed uscite (I/O) che saranno proprie del sistema reale [8] [10].

Combinando i benefici di uno sviluppo del sistema di controllo seguendo il principio della modellazione del sistema sfruttando sofisticati programmi di simulazione, unitamente a quelli per la generazione automatica del codice così da permettere i test in HiL, l'intero tempo di sviluppo di un nuovo sistema di controllo può essere ridotto quasi del 50% [8].

Come si è accennato sopra, per passare dall'ambiente di sviluppo del codice (no real time) all'ambiente target (real time), naturalmente devono essere considerati anche altri programmi software oltre al solo Simulink. Il modello implementato in Simulink (linguaggio di programmazione alto) viene convertito automaticamente mediante l'applicazione Real Time Workshop in C (livello di programmazione basso utilizzato dalla macchina). Da qui attraverso un compilatore (ad esempio Microsoft[®] Visual C++), il codice viene tradotto in un file accessibile al processore ed eseguibile in tempo reale (compilatore C → codice macchina).

A seconda che questo codice venga utilizzato nell'ambiente di sviluppo oppure nell'ambiente target si parlerà rispettivamente di Software in the Loop o di Hardware in the Loop (*Figura 8*).

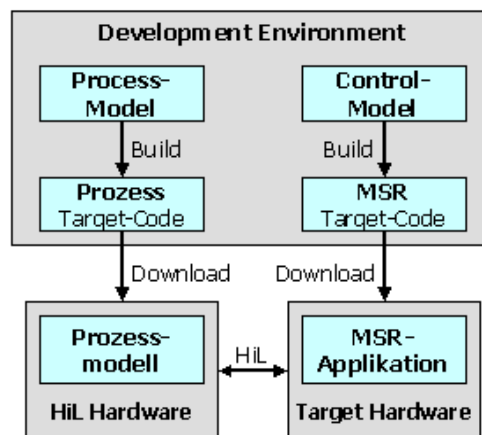


Figura 8: Simulazione Hardware in the Loop [8].

Tutti i segnali scambiati ed acquisiti dal sistema simulato durante l'Hardware in the Loop e durante le calibrazioni con il processo reale utilizzano bus elettronici (CAN). Questa scelta è stata effettuata considerando la possibilità offerta da questo tipo di bus di etichettare ogni segnale tenendone presente anche la priorità. Tutti i segnali analogici e digitali provenienti dal processo fisico sono acquisiti da vari dispositivi dedicati e tradotti in segnali digitali per la comunicazione CAN con il sistema di controllo. L'altro grande vantaggio dietro questa scelta è dato dalla riduzione al minimo dell'incidenza dei costi per i cablaggi.

La Figura successiva mostra in sintesi tutti gli strumenti necessari che sono stati utilizzati per sviluppare il codice e per testarlo sia in MiL che in simulazioni in HiL.

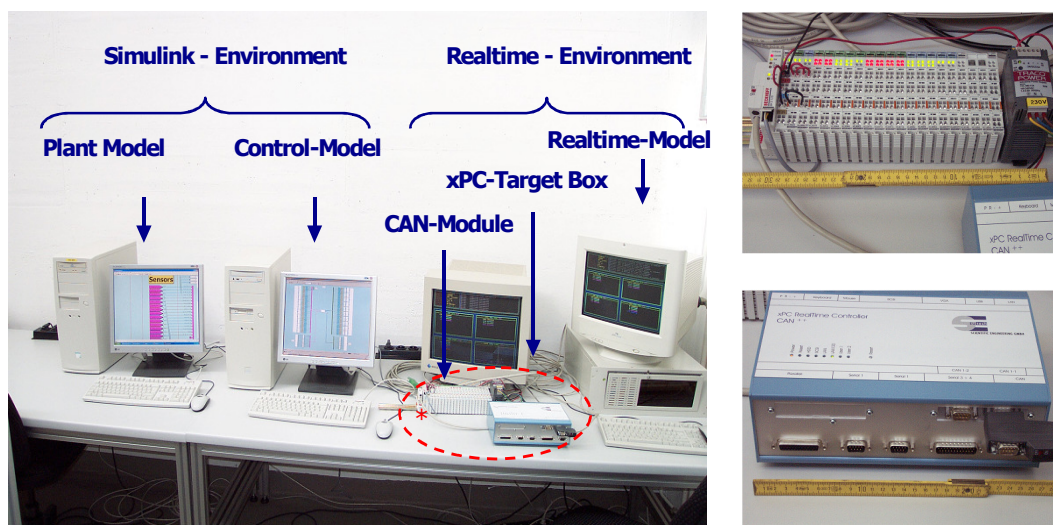


Figura 9: Attrezzature per le simulazioni Model in the Loop e Hardware in the Loop utilizzando l'xPC Target. Nei riquadri rispettivamente i bus CAN e l'xPC Target Box (per gentile concessione della EUTECH Scientific Engineering GmbH).

L'alta qualità del prodotto, i sempre più elevati limiti di sicurezza imposti, i punti di funzionamento il più vicino possibile ai limiti costruttivi richiesti all'interno delle specifiche di progetto e le esigenti scadenze progettuali dettate dal mercato hanno naturalmente tutti come comun denominatore la

massimizzazione dell'efficienze dell'impianto nonché dei profitti ad esso correlati mantenendo standard di sicurezza sempre il più elevati possibili.

3.4 MODEL BASED DESIGN

Come in precedenza accennato in ambito generale, il metodo adottato per lo sviluppo di questo progetto è stato quello del *Model based design*. La scelta dell'utilizzo di un modello del processo che deve essere controllato come base di partenza per lo sviluppo del suo sistema di controllo risiede quindi principalmente nei seguenti vantaggi:

- l'aumento della comprensione da parte del programmatore delle cause e degli effetti alla base dell'impianto
- la possibilità di ottimizzarne l'utilizzo anche sotto differenti condizioni difficilmente raggiungibili sperimentalmente
- la possibilità di portar a termine la gran parte dello sviluppo del codice di controllo senza la necessità di dover eseguire verifiche direttamente con l'impianto reale (sviluppendoli in contemporanea come, ad esempio, nel caso di questo progetto)
- la possibilità di ottimizzare e/o sviluppare strategie di controllo differenti rispetto a quelle comunemente adottate

Considerando le caratteristiche generali che un modello può avere, si andranno a presentare e chiarire nel prossimo capitolo i diversi tipi di modelli utilizzabili.

4 *MODELLI MATEMATICI*

Un *modello*, astrazione matematica di un processo (impianto) reale, non può naturalmente contenere tutte le caratteristiche del processo studiato. Parametro molto importante per la sua scelta risulterà essere il rapporto tra il “costo” (tempo e sforzo richiesti per la sua creazione e verifica) e l’accuratezza del modello stesso.

Non ci sono quindi *modelli* né “buoni” né “cattivi” ma solamente modelli che rispecchiano meglio o peggio i comportamenti del processo preso in esame rispetto a ben determinati scopi e parametri.

Si possono distinguere tre principali tipi di modelli parametrici:

- modelli teoretici (white-box)
- modelli semi-empirici (grey-box)
- modelli empirici (black-box)

I modelli empirici (black-box) prescindono totalmente da qualunque conoscenza od ipotesi sull’effettivo comportamento interno del sistema. Risulta essere una descrizione matematica delle relazioni tra i dati di ingresso e quelli in uscita.

Utilizzando questo approccio risulta essere molto importante la determinazione del corretto ordine del modello che meglio approssima il sistema dato.

Come mostrato in *Figura 10*, superato un certo limite, la netta variazione di pendenza della curva raffigurante l'errore in funzione del grado del polinomio scelto fa facilmente comprendere come la scelta di un modello di ordine minore debba sempre essere preferita rispetto all'utilizzo di modelli più complessi, soprattutto tenendo presente il trascurabile scarto di precisione che si va ad effettuare rispetto al grosso vantaggio che si ha nell'utilizzo di un modello meno complesso.

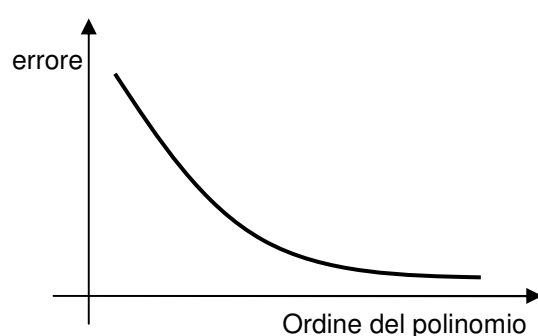


Figura 10: Errore del modello in funzione del grado del polinomio utilizzato.

I modelli semi-empirici ed i modelli teoretici o per indagine diretta (grey/white box) sono ottenuti, invece, tenendo in considerazione i legami fisici esistenti tra le diverse parti del sistema.

I modelli teoretici si utilizzano principalmente per rispondere a richieste di carattere generale, vista la loro non dipendenza dalla specificità dell'impianto a solo favore della tipologia. I modelli empirici e semi-empirici, utilizzando i dati reali ottenuti dal funzionamento dell'impianto, hanno la peculiarità di rappresentarne in tutto e per tutto non solo la tipologia ma anche la specificità.

Nei modelli empirici o semi-empirici, i parametri sono direttamente ottenuti mediante una loro identificazione attraverso la minimizzazione di un errore (come ad esempio l'errore quadratico medio).

$$V = \int_0^T \|y(t) - y_m(t)\|^2 dt \quad \text{sistemi continui}$$

$$V = \sum_{i=1}^k \|y(t) - y_m(t)\|^2 \quad \text{sistemi discreti}$$

Un criterio di scelta del tipo di modello da adoperare è sicuramente dato dall'ambito a cui deve servire. Partendo da questa affermazione si possono quindi distinguere due principali scopi nell'utilizzo di modelli matematici:

- simulazione (predizione del comportamento del sistema)
- sintesi del sistema (progettazione/dimensionamento delle sue parti in modo da fargli assumere un dato comportamento)

Mentre nel caso della simulazione i metodi empirici o semi-empirici possono essere scelti a seconda dell'opportunità che si ha, nel caso di una sintesi, l'unico metodo che può essere utilizzato è sicuramente quello semi-empirico (grey-box) in quanto risulta essere il solo nel quale i parametri scelti assumono anche un ben determinato significato fisico.

4.1 CASO STUDIATO

Nel caso studiato si è partiti utilizzando un modello semi-empirico semplificato che servisse alla descrizione di massima delle singole componenti facenti parte il sistema in tutte le condizioni di utilizzo senza però richiederne, per questo, una corrispondenza totale. I modelli delle singole componenti, quindi, presentano una somiglianza con l'impianto reale per quanto riguarda le costanti di tempo ed i valori a regime senza però avere una sistematica corrispondenza.

Questo tipo di approccio è risultato del tutto vincente per quanto riguarda gli scopi dettati dallo sviluppo del sistema di controllo sia durante la sua fase di realizzazione che, come enunciato nei paragrafi precedenti, durante quella di verifica.

Durante lo sviluppo del successivo codice di controllo, rivisto ed ottimizzato di modo da essere utilizzato assieme alla nuova generazione di impianti destinati alle prove sul campo (field tests), si è pensato ad una possibile identificazione più precisa dei modelli delle singole componenti di modo da essere in grado non solo di portare a termine lo sviluppo del prodotto nuovo ed ottimizzato (sistema di controllo), ma anche pensando e rivolgendo lo sguardo ai vantaggi che un modello di questo genere potrebbe introdurre in ambito generale.

Un modello così sviluppato infatti potrebbe servire sicuramente per un'ottimizzazione dei parametri di controllo anche in fasi precedenti alla sua calibrazione con il sistema reale. La simulazione risulterebbe sempre più precisa e corrispondente all'impianto studiato, introducendo il vantaggio di poter verificare, anche in fasi precedenti, il sistema di controllo come pure il modello dell'impianto in condizioni estreme realistiche, senza per questo correre il rischio di danneggiare il vero processo. Si potrebbe anche, sempre in vista dell'ingegnerizzazione del codice di controllo a fronte di una sua produzione in larga scala, iniziare a studiare e procedere ad una riduzione in parallelo della sua complessità senza per questo aver bisogno di un impianto fisico dedicato.

Il modello potrebbe essere quindi sfruttato anche per una definizione ottimale e preventiva di sequenze di esperimenti che debbano essere effettuati con il sistema nel corso della sua ingegnerizzazione pre-produzione senza per questo dover ricorrere direttamente ad un impianto reale.

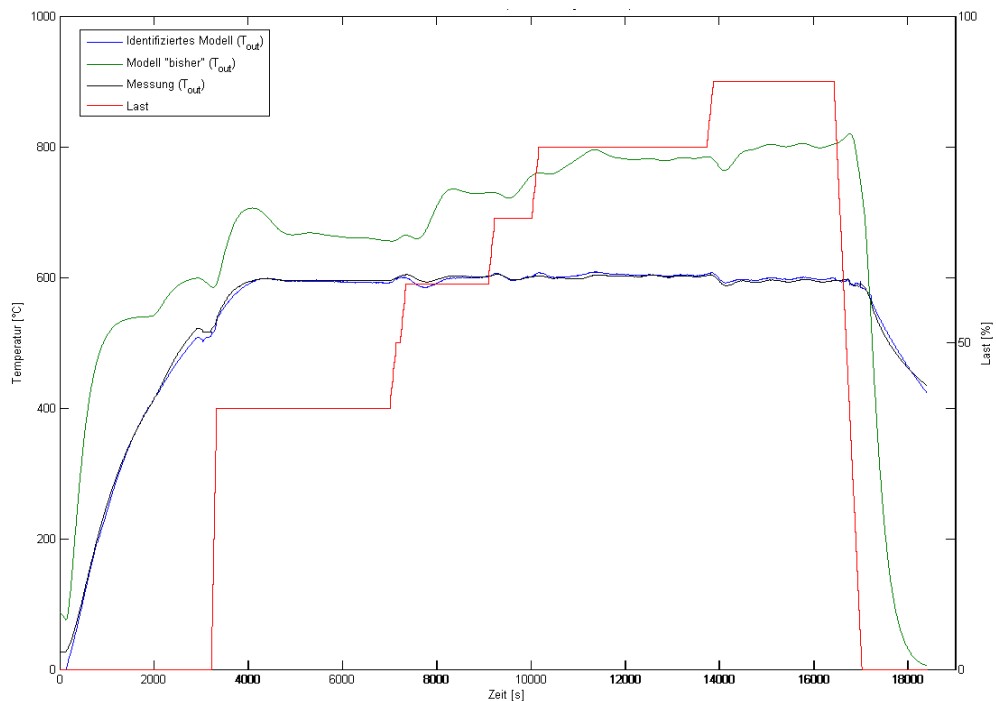


Figura 11: Comparazione tra dati reali e dati ottenuti con simulazioni di modelli differenti. Modello identificato (tratto blu), modello di partenza (tratto verde), misura diretta (linea nera) e carico di funzionamento (linea rossa).

Prima di poter essere messo in funzione in un'abitazione (field tests), un sistema di questo tipo deve essere sottoposto a numerose verifiche concernenti la sua sicurezza. L'impianto deve essere in grado di funzionare correttamente con diversi tipi di gas utilizzati come combustibile d'ingresso, come pure a diverse pressioni di rete delle condotte.

Anche le temperature devono essere tenute sotto controllo di modo da garantire un funzionamento in regola con gli standard definiti dalle normative.

L'esecuzione di queste verifiche naturalmente presume l'investimento di tempo considerevole.

L'utilizzo di un modello offre la possibilità di verificare tali procedure come pure di trovarne le sequenze di applicazione ottimali. Ciò che si è deciso a tavolino può essere confutato con l'utilizzo della simulazione molto velocemente prima della sua esecuzione effettiva con il prototipo reale.

I dati a disposizione per l'identificazione dei modelli sono ottenuti operando l'impianto con il sistema di controllo attivo. Questo aspetto non significa altro che l'identificazione sarà complicata da dati ottenuti in catena chiusa (closet-loop). Nel nostro caso il metodo adottato per questo tipo di identificazione è quello diretto. Di notevole rilevanza sono i risultati ottenuti da questo tipo di approccio osservabili in figura.

Nella *Figura 11* sono riportate la temperatura di un reattore all'interno dell'impianto analizzato nei tre seguenti casi: misura diretta (linea nera), ottenuta dal primo modello semplificato utilizzato per il progetto (linea verde) e da quello identificato avendo a disposizione i dati reali (linea blu).

Facendo il raffronto dei due modelli simulati si vede subito come nel primo caso sia le costanti di tempo che la dinamica propria delle componenti prese in esame rispecchiano i dati reali mentre i valori a regime presentano degli scostamenti addirittura dipendenti dal valore del carico assegnato. Nel secondo caso invece si può facilmente notare come la somiglianza tra modello e dati reali sia elevatissima: stessa costante di tempo, stessa dinamica come pure gli stessi valori a regime.

4.2 IDENTIFICAZIONE IN RETROAZIONE

Per spiegare e validare la scelta adottata si devono però, più in generale, affrontare e discutere gli aspetti principali riguardante l'identificazione di sistemi in retroazione.

Nella pratica industriale è spesso necessario identificare sistemi operanti in catena chiusa. Questa necessità può essere definita sia da aspetti economici che di sicurezza.

Il primo vantaggio facilmente osservabile è dato dalla possibilità di mantenere l'impianto, il processo che si vuole modellare, entro i limiti corretti di utilizzo. Nel caso, ad esempio, di impianti che presentano instabilità in catena aperta questo tipo di approccio è sicuramente inevitabile per la salvaguardia del processo stesso. Nel caso di un processo di produzione il grande vantaggio risiede nella non necessaria diminuzione degli standard qualitativi riguardanti il prodotto durante la fase di identificazione.

Considerando le tempistiche necessarie per ottenere le informazioni adeguate per identificare correttamente il sistema, se si eseguissero questi esperimenti bloccando la catena produttiva, i costi per l'identificazione sarebbero chiaramente inadeguati ed elevatissimi.

Come dato d'esempio, si può riportare il dato che l'identificazione di processi come grosse colonne per la distillazione, operando dei test a gradino, risiede nell'ordine dei giorni mentre si arriverebbe perfino all'ordine delle settimane per test di tipo a scala [11].

Tutti questi vantaggi portano sicuramente ad una chiara diminuzione dei costi necessari per operare un'identificazione di sistema.

Il maggior problema di un'identificazione in catena chiusa, dove si ha quindi la continua compensazione da parte del controllore della deviazione rispetto ai valori di riferimento dati, è il minor contenuto di informazioni comparate con quelle ottenibili in catena aperta [12].

In aggiunta, come conseguenza della retroazione, il segnale di ingresso all'impianto $u(t)$ è fortemente correlato al disturbo $v(t)$. Per questo motivo non tutti i metodi di stima possono essere utilizzati nel caso di una identificazione per via diretta.

La *Figura 12* fornisce lo schema generale delle principali componenti e dei segnali da tenere in considerazione.

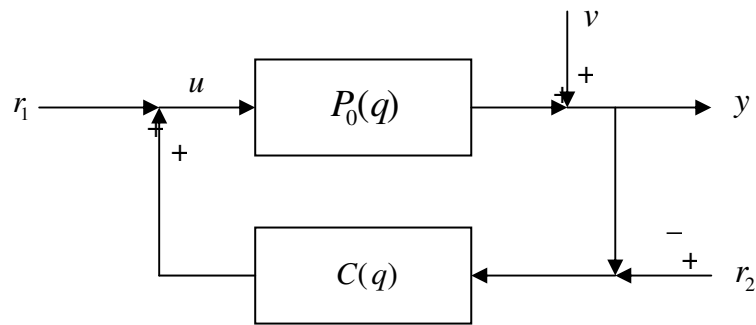


Figura 12: Configurazione di sistema in catena chiusa.

Il sistema è descritto dalle relazioni seguenti dove $H_0(q)$ è il modello del disturbo, mentre $e(t)$ è il disturbo di tipo bianco.

$$y(t) = P_0(q)u(t) + v(t)$$

$$y(t) = P_0(q)u(t) + H_0(q)e(t)$$

Il segnale generale di riferimento è descritto come

$$r(t) = r_1(t) + C(q)r_2(t)$$

Le possibili funzioni di trasferimento che possono essere definite in catena chiusa descrivono le relazioni tra le seguenti grandezze

$$T(P_0, C) = \begin{bmatrix} T_0 & G_0 \\ Q_0 & S_0 \end{bmatrix}$$

$$T_0 = P_0[I + CP_0]^{-1}C$$

$$G_0 = P_0[I + CP_0]^{-1}$$

$$Q_0 = [I + CP_0]^{-1}C$$

$$S_0 = [I + CP_0]^{-1}$$

dove $C(q)$ = funzione di trasferimento del controllore

$P_0(q)$ = funzione di trasferimento dell'impianto

$G_0(q)$ = funzione di trasferimento da r_1 a y

$Q_0(q)$ = funzione di trasferimento da r_2 a u

$S_0(q)$ = funzione di trasferimento da r_1 a u

$T_0(q)$ = funzione di trasferimento da r_2 a y

4.2.1 METODO DIRETTO

L'identificazione utilizzando il metodo diretto è l'approccio più ovvio e, nel caso di sistemi in catena chiusa, deve essere considerato come il primo metodo di scelta.

Il segnale di ingresso all'impianto $u(t)$ ed il segnale d'uscita $y(t)$ sono utilizzati quindi come nel caso di un'identificazione in catena aperta. Il modello è ottenuto direttamente senza la necessità di effettuare altri calcoli.

Nella *Figura 13* la linea tratteggiata delimita chiaramente i confini entro il quale viene stimato l'impianto.

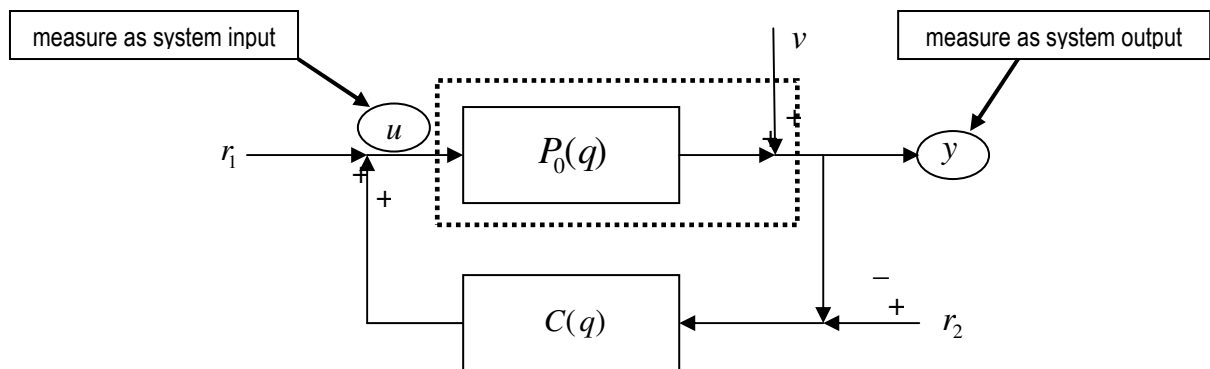


Figura 13: Configurazione del sistema per identificazione diretta.

Questo tipo di approccio presenta numerosi vantaggi. Non ha nessuna correlazione con la natura o la complessità del controllore.

Uno svantaggio è però dato sicuramente dal non poter utilizzare qualsiasi metodo di stima.

Il metodo di predizione dell'errore (PEM), grazie alla possibilità che presenta di gestire la correlazione dei disturbi del segnale d'ingresso, fornisce sicuramente ottimi risultati.

4.2.2 METODO INDIRETTO

Il metodo indiretto, come mostrato in *Figura 14*, identifica in prima istanza la completa catena di controllo. In un secondo momento, utilizzando informazioni riguardanti il controllore, si calcola il modello dell'impianto.

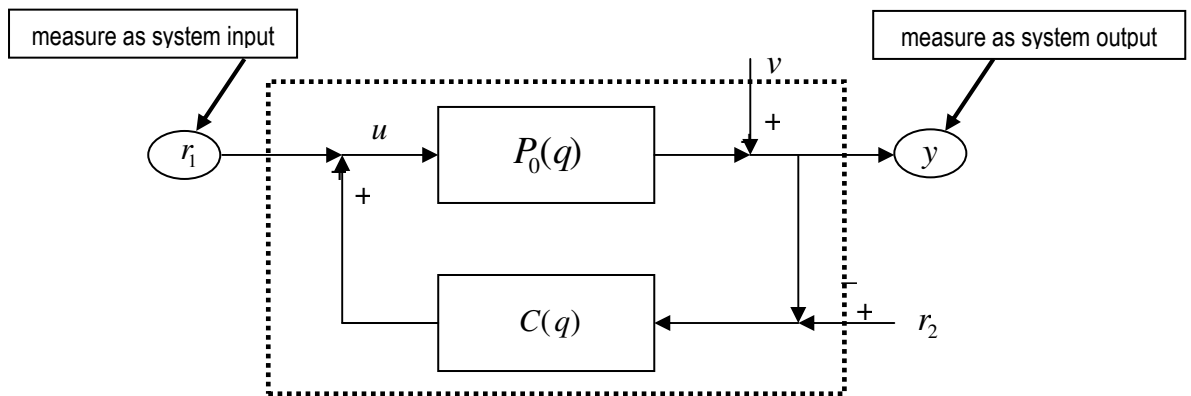


Figura 14: Configurazione del sistema per identificazione indiretta.

Questo approccio può utilizzare qualsiasi metodo di sintesi visto che si tratta esattamente di un problema di identificazione in catena aperta.

Di contro, come già accennato, è necessaria la precisa conoscenza delle leggi alla base del sistema di controllo [13] di modo da calcolare il modello dell'impianto dal modello stimato per la catena chiusa.

Questo calcolo ha delle restrizioni matematiche funzione delle dimensioni dei segnali d'ingresso e d'uscita come nel caso di sistemi multivariabili [14].

Queste restrizioni dipendono anche da quale funzione di trasferimento in catena chiusa venga identificata. Nessuna restrizione è richiesta nel caso dell'utilizzo della relazione tra il segnale di riferimento $r_1(t)$ e l'uscita $y(t)$.

$$\hat{G} = \hat{P}[I_m + C\hat{P}]^{-1}$$

Risolvendo rispetto a \hat{P} si ottiene.

$$\hat{P} = \hat{G}[I_m - C\hat{G}]^{-1}$$

Un'importante differenza tra il metodo diretto ed indiretto è dato dal fatto che l'ordine del modello aumenta significamente nel secondo caso. Questo sarà tipicamente dato dalla somma del modello in catena chiusa più quello del controllore [15].

4.2.3 METODO “JOINT INPUT-OUTPUT”

Un terzo metodo di identificazione per sistemi in catena chiusa è definito unione ingresso-uscita (*joint input-output*). Questa tecnica utilizza due modelli: descrizione della relazione tra i segnali di ingresso ed uscita dell'impianto ed il segnale di riferimento.

Come per il caso indiretto, la stima dei due modelli ricade essenzialmente in un problema di identificazione in catena aperta visto che i segnali di ingresso e di uscita non sono correlati. È quindi possibile utilizzare qualsivoglia metodo di stima.

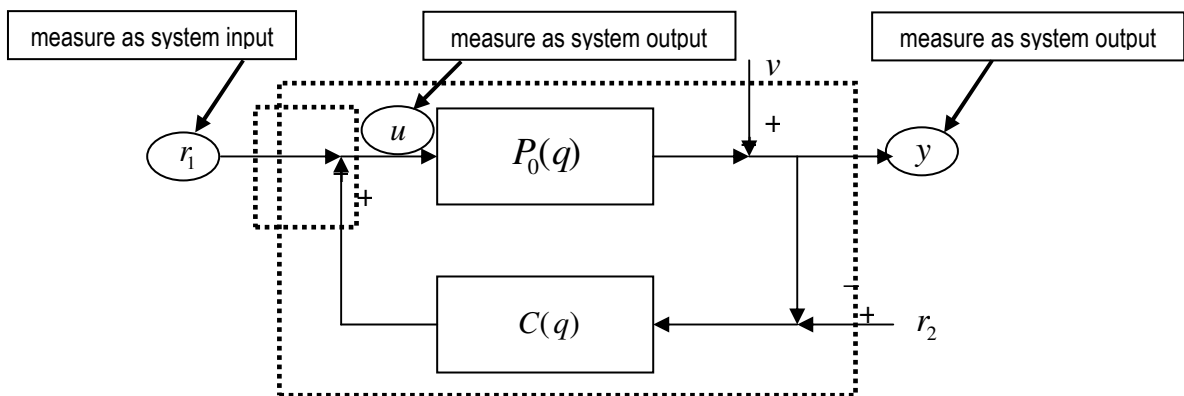


Figura 15: Configurazione del sistema per identificazione “joint input-output”.

Come mostrato in *Figura 15*, il modello dell'impianto può essere calcolato utilizzando le due funzioni di trasferimento ottenute.

Qui di seguito le relazioni utilizzate per calcolare il modello dell'impianto a seconda che si sia considerato il segnale di riferimento rispettivamente $r_1(t)$ o $r_2(t)$.

$$\frac{G_0}{S_0} = \frac{P_0[I + CP_0]^{-1}}{[I + CP_0]^{-1}} = P_0$$

$$\frac{T_0}{Q_0} = \frac{P_0[I + CP_0]^{-1}C}{[I + CP_0]^{-1}C} = P_0$$

A fronte di quanto detto si evince subito il vantaggio di non dover conoscere a priori la funzione di trasferimento del controllore utilizzato C .

Uno svantaggio si riscontra quando si calcola il modello dell'impianto e l'ordine del modello aumenta significamente. Per questa ragione è necessario applicare metodi di riduzione dell'ordine del modello se si vogliono ottenere risultati accettabili.

4.2.4 METODO A DUE STADI

Un metodo simile a quello appena descritto è il cosiddetto metodo a due stadi [15]. Prima si identifica la funzione di sensitività $S_0(q)$ o $Q_0(q)$ utilizzando misure dei segnali di riferimento $r(t)$ e dell'ingresso $u(t)$. Nel secondo stadio, questa funzione viene utilizzata per calcolare una stima del segnale in ingresso all'impianto $u(t)$.

$$\hat{u}(t) = \hat{S}r_1(t)$$

$$\hat{u}(t) = \hat{Q}r_2(t)$$

A questo punto il modello vero e proprio viene stimato usando il segnale di ingresso così calcolato $u(t)$ e quello di uscita misurato $y(t)$. In questo approccio si controlla meglio l'ordine del modello calcolato [15].

A fronte di quanto detto, l'identificazione mediante metodo diretto deve quindi essere presa come l'approccio standard per sistemi in catena chiusa. I metodi indiretti o di unione ingresso-uscita non forniranno risultati mai migliori di quelli ottenuti col metodo diretto.

5 SISTEMA DI CONTROLLO

Per quanto riguarda in dettaglio la struttura del sistema di controllo si può partire con il considerare che, il sottosistema stack (celle a combustibile) così come il sottosistema generatore di gas, operano in numerosi stati differenti. Questi sono funzione dei fluidi operatori (gas naturale, vapore d'acqua, azoto, ecc...), delle condizioni di carico e delle varie condizioni di utilizzo (nominali, avviamento, spegnimento ed emergenza).

Per amministrare tutte queste diverse condizioni si è fatto uso della potente toolbox StateFlow[®] che ha permesso di strutturare il sistema di controllo in modo da avere, e quindi gestire, tutti sistemi di tipo SISO anche se si partiva con una chiara struttura di tipo MIMO.

5.1 MACCHINE A STATI

StateFlow[®] fornisce descrizioni chiare e concise dei comportamenti di sistemi complessi utilizzando la teoria delle macchine a stati, schemi a blocchi e diagrammi di transizione tra stati in un'unica applicazione.

Si deve innanzitutto considerare che uno stato non è altro che un insieme di condizioni, circostanze che devono essere eseguite in contemporanea e, nella stragrande maggioranza dei casi, in differenti parti del sistema.

Prendendo in considerazione una generica macchina a stati come in *Figura 16* si può immediatamente evincere con facilità la semplice notazione grafica utilizzabile da StateFlow®.

Ogni blocco (nel caso specifico undici) corrisponde ad uno stato. Ad ogni stato è associato, per esempio, un numero che permette, nel resto del codice di controllo, di far funzionare i vari controlli nel modo prestabilito dalle specifiche tecniche di progetto.

Quando uno stato è attivo, il diagramma esegue tutte le condizioni correlate a quello stato. L'attivazione e la disattivazione degli stati all'interno del diagramma a blocchi, è basata su eventi e condizioni ben definite all'ingresso del suddetto blocco.

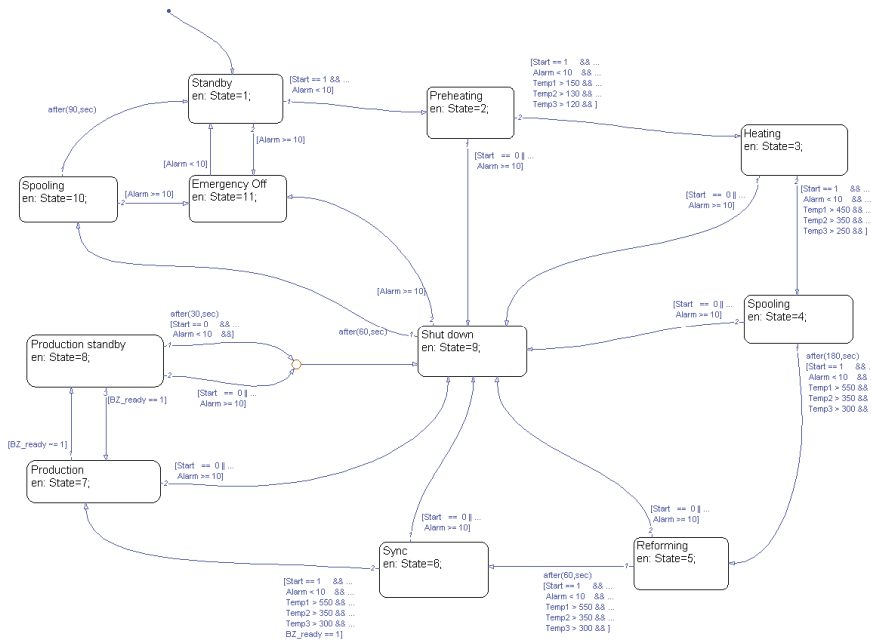


Figura 16: Diagramma a stati [10].

I vari eventi devono essere scanditi da un segnale che, nel caso preso in esame, corrisponde al tempo di esecuzione del codice. Questo fa sì che, in ogni momento dell'esecuzione del codice di controllo, il diagramma sia una combinazione di stati attivi ed inattivi.

Tutti gli eventi che influenzano il diagramma a stati devono essere ben definiti dall'utente.

Considerando di nuovo il diagramma di *Figura 16*, si può vedere come gli undici stati sopra descritti siano interconnessi graficamente da delle frecce. Ogni freccia corrisponde ad una transizione tra uno stato e l'altro; nient'altro che una legge binaria (vero/falso). Naturalmente tutte le condizioni implementate in una transizione devono essere verificate per poter essere eseguite e per poter passare da uno stato all'altro.

Nelle macchine a stati utilizzate in questo progetto, ad esempio, vista la natura dell'impianto da controllare, le transizioni tra uno stato e l'altro sono per la stragrande maggioranza definite da delle disuguaglianze tra temperature nei vari reattori.

Come si vedrà anche in seguito, nelle varie versioni del codice di controllo programmato, le condizioni alla base delle transizioni sono state svincolate dal diagramma stesso in modo da permettere la più flessibile parametrizzazione da parte dell'operatore.

Grazie a questi accorgimenti, nella maggior parte dei casi, è stato più che sufficiente introdurre dei regolatori proporzionali-integrali con al loro interno un dispositivo anti wind-up (PI-AW) per vincere la lenta dinamica del processo.

5.2 CONTROLLI PI-AW

L'uso di regolatori per l'operazione di sintesi di un sistema controllato in retroazione significa l'introduzione di un sistema algebrico (regolatore) in un qualche punto della catena di controllo (*Figura 17*).

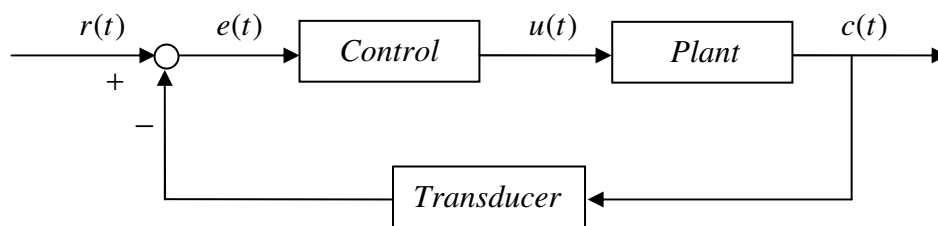


Figura 17: Tipico schema di controllo in retroazione.

In questo caso specifico i regolatori vengono utilizzati per controllare ed aggiustare principalmente le temperature e le portate all'interno dei singoli reattori facenti parte il sistema di produzione dell'idrogeno e nei vari circuiti di raffreddamento per quanto riguarda il sistema fuel cell vero e proprio.

Questo tipo di regolatori permette di avere una risposta rapida grazie alla parte proporzionale (P) e non presentare errori all'infinito grazie invece all'introduzione della parte integrale (I).

In aggiunta, tutti i regolatori in retroazione utilizzati nel codice di controllo preso in esame hanno un dispositivo di anti wind-up.

Questo dispositivo può essere semplicemente spiegato nel modo seguente. Quando l'errore è positivo, cioè la variabile controllata si trova ad avere un valore minore del suo corrispondente valore di riferimento (*Figura 18*), e allo stesso tempo l'attuatore, che permette la regolazione del segnale sopra citato, si trova già nella sua estremità massima (ad esempio 100%) la parte integrale all'interno del regolatore è congelata.

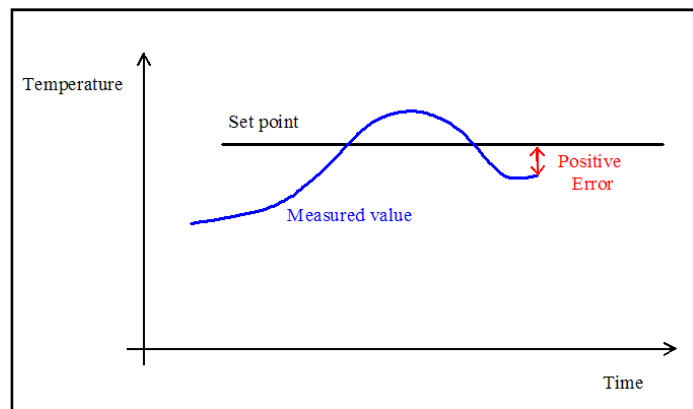


Figura 18: Errore positivo.

La stessa cosa accade nel caso simmetricamente opposto in cui l'errore risulta essere negativo (variabile controllata con valore maggiore rispetto al suo riferimento - *Figura 19*) e l'attuatore è già nella sua posizione minima (ad esempio 0%).

Questo dispositivo, come già accennato, è introdotto vista la lenta dinamica del sistema da controllare. In questo modo, ad esempio, durante i lenti transitori di avviamento, i regolatori reagiscono più velocemente quando le variabili controllate si ritrovano, anche dopo tempi lunghi, in prossimità dei loro valori di riferimento.

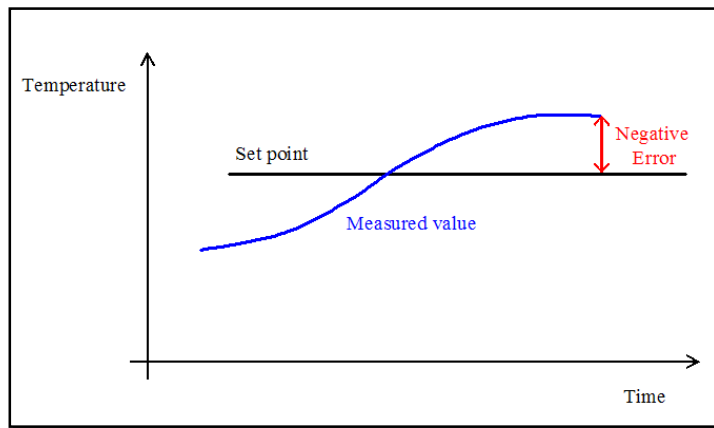


Figura 19: Errore negativo.

Senza l'introduzione di un dispositivo di questo tipo, il sistema presenterebbe delle sovra e sottoelongazioni inaccettabili.

5.3 CONTROLLI FUZZY

Nelle prime generazioni dell'impianto, per la sua criticità e per le numerose variabili da tenere in considerazione, il controllo della potenza prodotta dallo stack è stato affidato ad un sistema basato sui controlli Fuzzy². Nello specifico si è utilizzato un controllo Fuzzy di tipo scalare [16][17][18].

² La teoria della logica Fuzzy è stata introdotta per la prima volta in un articolo scientifico pubblicato nel 1965 da Latfi A. Zadeh su "Information and Control".

5.3.1 CONTROLLI FUZZY SCALARI

La teoria alla base di questo regolatore non è altro che un'estensione della nota teoria degli insiemi Fuzzy in cui si prevede la più facile possibilità di rappresentare ed implementare conoscenze umane non precise [16].

Questa teoria utilizza funzioni di appartenenza per gli operatori invece che per gli ingressi e le uscite, così da semplificare considerevolmente sia l'implementazione delle leggi che la loro verifica e validazione [17].

Gli operatori di un controllo Fuzzy di tipo scalare comparano direttamente valori numerici senza una loro trasformazione in variabili linguistiche e la successiva ritrasformazione come nel caso della normale teoria Fuzzy (*fuzzyfing* e *defuzzyfing*). Viene utilizzata solo una legge "più ... e ..." dove il numero delle variabili d'ingresso determina il numero delle sottoleggi.

Il risultato di una comparazione di un controllo Fuzzy di tipo scalare ricade sempre tra i valori zero (0) ed uno (1), dove uno significa che la legge è completamente soddisfatta e zero viceversa.

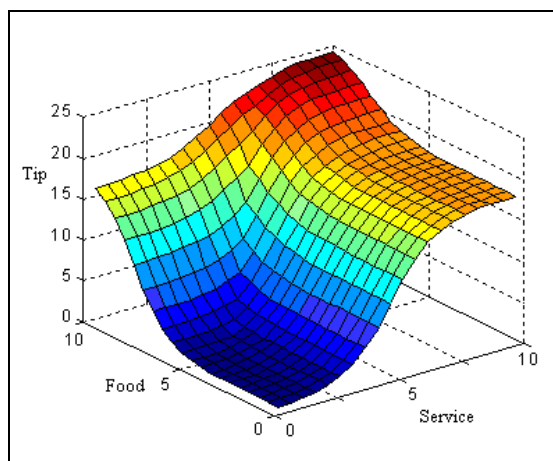


Figura 20: Spazio del processo di inferenza risultante (teoria Fuzzy scalare).

Un grosso vantaggio riscontrabile nell'utilizzo di controlli Fuzzy scalari è dato dalla forma più dolce delle funzioni utilizzate (*Figura 20*) rispetto a quella più spigolosa (*Figura 21*) ottenibile utilizzando non del tutto correttamente la teoria convenzionale degli insiemi Fuzzy [18].

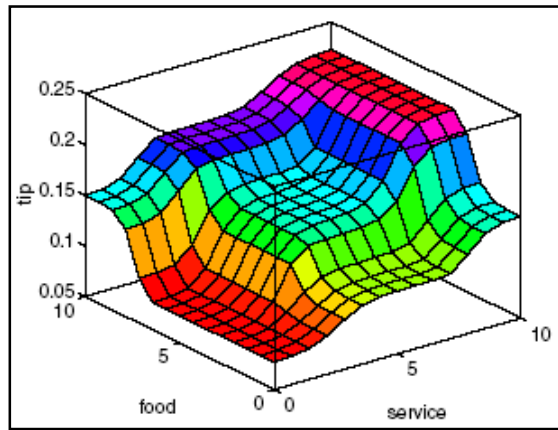


Figura 21: Spazio del processo di inferenza risultante (teoria Fuzzy convenzionale).

Nel caso analizzato, mediante un carico elettrico collegato ai due capi dello stack, in cui può essere variata la resistenza interna e quindi la corrente che vi circola, il sistema di controllo impone il giusto valore di corrente allo stack, la sua temperatura come pure la corretta portata d'aria al suo ingresso così che i valori delle tensioni delle singole celle risultino le più costanti possibili.

Questo particolare controllo, che utilizza un operatore logico Fuzzy maggiore (\int) calcola la funzione d'uscita grazie all'utilizzo di tangenti ed arcotangenti iperboliche. Ad esempio, per il controllo preso in esame, una legge può essere espressa nel seguente modo:

*“più la minima tensione di cella è maggiore di 0,5 [V],
più la corrente elettrica deve essere massimizzata.”*

La sua formula matematica corrispondente è data dalla relazione:

$$I_{Load} = I_{Desired} \left(u_{cell,min} \begin{matrix} f \\ > 0,5 \\ mod \end{matrix} \right)$$

dove I_{Load} è il valore istantaneo della corrente mentre $I_{Desired}$ è il valore di riferimento che si vuole raggiungere.

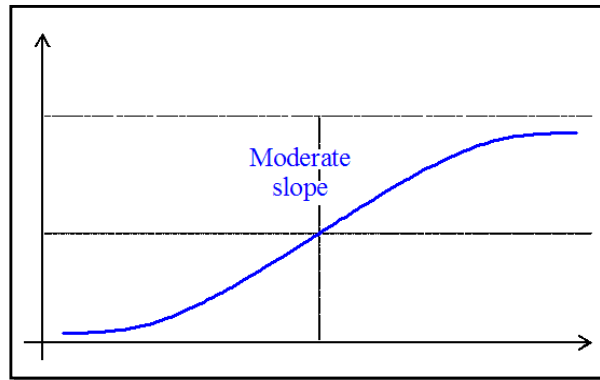


Figura 22: Funzione con una pendenza di tipo moderato.

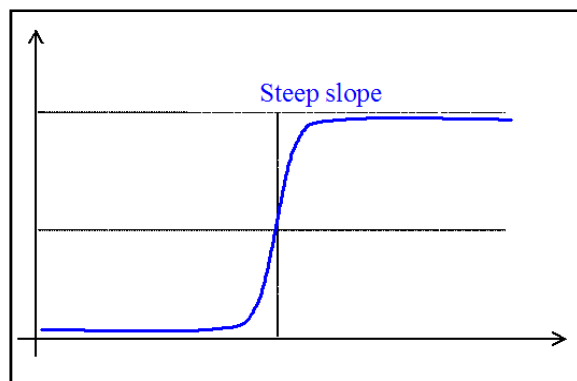


Figura 23: Funzione con una pendenza di tipo ripido.

Come si può vedere dalla formula sopra riportata, in questo caso, la pendenza è di tipo moderato come pure il punto di flesso è uguale a 0,5 (media tra il valore minimo possibile 0 [V] e quello massimo 1 [V]).

Nella *Figura 22* si può vedere una funzione come quella sopra citata con una pendenza di tipo moderato, mentre in *Figura 23* il suo opposto, una di tipo molto ripido.

Il regolatore in questione utilizzato all'interno del codice di controllo adatta automaticamente il punto di flesso alla media tra i valori minimi e massimi delle tensioni di cella.

Questo tipo di controllo è stato necessario in quanto, noto il comportamento della tensione in funzione della corrente, il dispositivo cerca di guidare lo stack lungo valori di tensione vicini al punto di instabilità così da massimizzare la potenza prodotta (*Figura 24*).

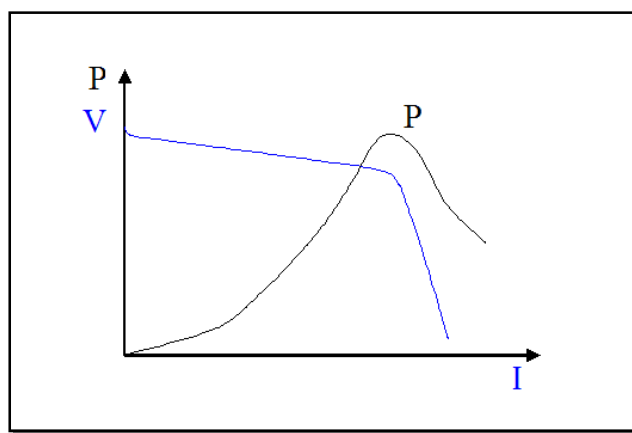


Figura 24: Andamento della tensione e della potenza in funzione della corrente.

5.4 OTTIMIZZAZIONE DEL CODICE

Nelle generazioni dell'impianto successive, in cui molte componenti, come lo stack, sono state migliorate ed ottimizzate, anche il codice di controllo ha subito delle sensibili modificazioni. Ad esempio, nel caso specifico del controllo riguardante il sottosistema stack, questo è stato notevolmente semplificato.

Il controllo di tipo Fuzzy sopra riportato, infatti, non è stato più necessario grazie alla migliorata operatività delle celle come pure delle condizioni in ingresso ad esse.

Grazie, quindi, solamente al miglioramento dei punti di funzionamento di molte componenti presenti nel sistema (soprattutto per quanto riguarda il sottosistema generazione del gas idrogeno), i semplici controlli proporzionali-integrali, coordinati dalle riviste macchine a stati, sono stati sufficienti per il corretto funzionamento e controllo del sistema.

Nelle prime generazioni del prototipo, gli obiettivi del sistema di controllo sono stati il funzionamento del processo in condizioni stabili per diversi valori di carico di metano (da 40% fino al 100%) in ingresso al sistema di generazione del gas. Questo significa controllare le temperature nei vari reattori in modo da far avvenire le reazioni in condizioni ottimali e quindi avere una percentuale di monossido di carbonio nel flusso di gas, in ingresso alle celle, non superiore di 50 ppm. Considerando il sottosistema stack, invece, l'obiettivo principale risulta essere quello di stabilizzare i valori di tensione delle singole celle di modo da ottenere sia calore che potenza elettrica costante.

5.5 ENERGY MANAGER

In fasi successive, ed in particolare nel caso dell'ultima generazione, il carico non è più definito arbitrariamente dall'operatore ma è definito a fronte di un controllo in grado di amministrare l'energia dell'abitazione dove il sistema si trova ad operare.

Questo controllo ed amministratore dell'energia si trova ad operare non solo con l'impianto a celle a combustibile ma con tutte le altre componenti presenti nell'abitazione come ad esempio boiler, impianti per sopperire ai picchi di potenza, ecc... .

Una volta sviluppato ed ottimizzato l'impianto a celle a combustibile è necessario anche considerare e sviluppare il design (scelta e dimensionamento) delle possibili componenti che devono interagire con questo.

Durante questo progetto si è anche investigato e dimensionato, cercandone la configurazione ottimale, l'intero complesso di componenti necessarie per il funzionamento dei un sistema di questo tipo (micro-CHP).

Se, come si è visto, sono state necessarie simulazioni (modellazione) dettagliate per poter sviluppare e mettere in esercizio un impianto a celle a combustibile in maniera più sicura e veloce, simulazioni del sistema come insieme (ad esempio bilanci energetici) hanno reso possibile lo studio dell'impianto come un sistema unico all'interno dell'abitazione [9].

Dopo aver modellato e sviluppato diverse tipologie di impianti facenti tutti uso di celle a combustibile, sono state condotte simulazioni di sistema in modo da eseguirne una comparazione sempre con l'attenzione rivolta ad i valori ottenuti con impianti convenzionali.

Come già rimarcato in questa tesi, l'utilizzo della simulazione a diversi gradi di complessità, ha permesso, in qualsiasi livello, di ottimizzare i risultati ottenibili utilizzando un approccio standard.

Nel caso specifico, ad esempio, si sono ricercate le configurazioni e gli algoritmi di controllo utili alla riduzione dei costi generali di utilizzo come pure la riduzione dell'emissioni inquinanti.

Solamente variando le condizioni e le strategie alla base del sistema di amministrazione generale dell'energia per quanto riguarda il numero di fasi di accensione e spegnimento dell'impianto studiato, si è riusciti ad ottenerne una riduzione fino al 94% su scala annua (*Figura 25*) [9].

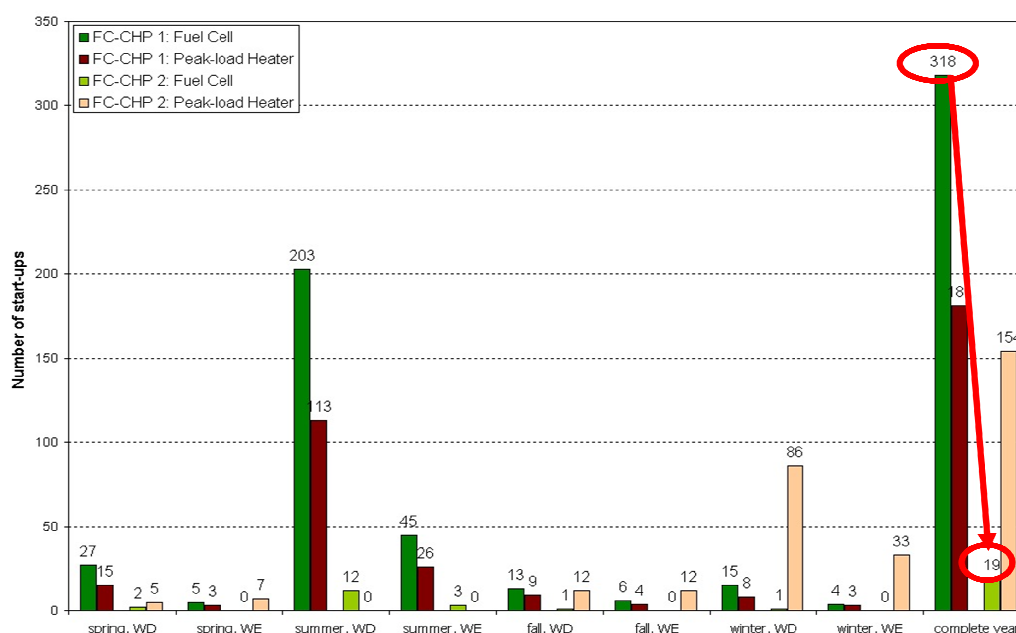


Figura 25: Comparazione attraverso simulazione annuale di un impianto tradizionale ed uno con celle a combustibile [9].

Questo valore è significamente importante considerando l'aspetto che il numero di accensioni è direttamente proporzionale alla quantità di emissioni inquinanti (ad esempio CO_2) prodotte.

Un altro aspetto molto importante del codice di controllo è da ritrovarsi anche nell'ambito della sicurezza. Numerosi tipi di allarmi e la loro gestione ha ricoperto un ruolo molto significativo nella fase di progettazione attraverso la

loro implementazione in modo del tutto generico, rendendo possibile all'utente finale la loro completa gestione on-line.

Questi allarmi non sono stati introdotti solamente per gestire le varie condizioni di emergenza ma anche per garantire che il prototipo studiato operi in completa sicurezza sotto ogni tipo di condizione. Questo aspetto è da enfatizzare soprattutto considerando che alcune componenti del sistema risultano essere uniche e molto difficili da sostituire per quanto riguarda l'incidenza economica che ricoprono all'interno del sistema soprattutto in riferimento ai loro lunghi tempi di produzione.

5.6 FIELD TEST

Un altro aspetto preso in considerazione nella progettazione e nello sviluppo dell'ultima versione del codice di controllo, soprattutto considerando le specifiche richieste ed introdotte solo di recente alla luce delle prossime prove sul campo (field-test), è quello dell'ottimizzazione di alcune sue componenti ed algoritmi, della maggior flessibilità di impiego come pure della salvaguardia di tutti gli aspetti di sicurezza dettati dalle normative vigenti durante il suo funzionamento.

Queste tre tematiche molto importanti hanno comportato il ripensamento e la riprogettazione della struttura alla base del codice di controllo. In dettaglio si sono andate a studiare ed ottimizzare componenti e problematiche specifiche come ad esempio le macchine a stati (riviste, aggiornate e corrette) e lo svincolamento del codice compilato da tutti i parametri utilizzati al suo interno.

Fino a questo momento l'intero codice era fortemente vincolato al dispositivo fisico che si doveva controllare. I parametri di controllo come pure i numerosi vincoli e condizioni alla base delle macchine a stati erano salvati direttamente

all'interno dell'applicazione come vere e proprie costanti scritte e fissate al codice stesso. Era naturalmente possibile modificare ed ottimizzare queste costanti durante il funzionamento del sistema (on line) e mantenerne traccia ma solamente fino a quando il dispositivo (xPC Real Time Controller) era alimentato da corrente. La grossa restrizione era dettata dal fatto che non si potesse effettuare in modo diretto e programmatico all'interno del codice visto che l'applicazione era composta da un insieme di parametri di partenza o standard salvati direttamente nel codice compilato. Ogni qual volta si dovesse cambiare uno o più di questi parametri si doveva procedere al salvataggio di una nuova applicazione ed alla redazione di una nuova versione andando a modificare direttamente il valore desiderato. L'applicazione così definita veniva a questo punto di nuovo salvata nella memoria temporanea del controllore.

Con questa architettura, qualora si fosse verificato un black-out od una più semplice anomalia nella rete di alimentazione, il Target PC si sarebbe riavviato senza il codice al suo interno. Un operatore avrebbe dovuto ricaricare il codice compilato all'interno del controllore chiaramente con al suo interno i parametri standard di partenza salvati nell'ultima versione.

Questo tipo di programmazione, che nelle fasi preliminari dello sviluppo del prototipo è risultata essere affidabile e corretta, poteva sicuramente essere ottimizzata a fronte della richiesta dell'utilizzo del sistema di controllo con diversi sistemi per affrontare i test sul campo. Durante questi test, il codice di controllo, come nell'esempio sopra citato di un black-out, deve non solo poter continuare a far funzionare correttamente il processo ma deve anche permettere maggior flessibilità per quanto riguarda i suoi parametri di funzionamento.

Per questa versione il codice di controllo viene quindi compilato attivando l'opzione "embedded code". Questa opzione crea un file direttamente eseguibile dal Target PC al suo avviamento se debitamente salvato nella memoria permanente del sistema.

Oltre a questo, si sono programmati dei blocchi in Simulink che permettessero di richiamare ed utilizzare all'interno di un'applicazione parametri (di qualunque dimensione) salvati in un file esterno all'applicazione stessa.

In questo modo la versione del software potrà essere sempre la medesima per quanto riguarda le sue funzionalità anche se utilizzata in diversi sistemi mentre è concessa la possibilità che ogni sistema operi rispettivamente con insiemi di parametri propri.

Questi valori devono essere solamente salvati e caricati nelle memorie permanenti del Target PC e sono richiamati automaticamente all'esecuzione del codice di controllo solamente utilizzandone la stringa corrispondente.

Nello stesso modo le definizioni degli allarmi sono formate utilizzando una matrice salvata sempre in un file della memoria del controllore. Come nelle versioni precedenti del codice di controllo, anche utilizzando questa soluzione, tutti i parametri, come pure la matrice di definizione degli allarmi possono essere modificati on-line, ovvero con il processo in funzione.

Per quanto concerne la struttura e la funzionalità generale delle varie macchine a stati, queste sono rimaste pressoché invariate. Durante la stesura dell'ultima versione del codice solamente alcuni stati e transizioni sono stati introdotti e migliorati a fronte dell'esperienza maturata da parte degli operatori nell'utilizzo delle versioni precedenti. A riguardo si deve sottolineare come sia importante la progettazione e la definizione di tali algoritmi in stretta collaborazione con personale avente conoscenze specifiche del processo da controllare. In seguito è possibile, utilizzando la simulazione del processo, programmare correttamente ed ottimizzare questi algoritmi.

Un altro aspetto introdotto di recente nella scrittura dell'ultima versione del codice di controllo riguarda il calcolo dell'efficienze e dell'energie termiche ed elettriche raggiunte dal sistema.

Questi valori, unitamente ad altre importanti informazioni per la gestione e l'ottimizzazione dell'impianto durante i test sul campo sono salvati dal sistema

di controllo automaticamente e costantemente in file dedicati di modo da mantenerne la traccia in qualsiasi condizione e momento di utilizzo.

6 CONCLUSIONI

Dopo che il modello in Simulink del sistema a celle a combustibile ed il suo sistema di controllo sono stati testati all'interno dello stesso ambiente di programmazione (Model in the Loop), il definitivo codice di controllo è stato generato. Questo è stato fatto separando il sistema di controllo dal modello del processo a livello dei segnali I/O (Hardware in the Loop).

Tutte le simulazioni effettuate durante questa fase devono quindi essere valutate tenendo sotto controllo la lista degli allarmi presenti. Mediante le macchine a stati, infatti, dove tutte le condizioni necessarie al funzionamento del sistema vengono costantemente verificate, è possibile rendersi conto di eventuali anomalie sia per quanto riguarda il modello del sistema di controllo sia anche per quanto riguarda l'implementazione del processo fisico.

Sia durante il Model in the Loop che l'Hardware in the Loop, i test effettuati sono stati tutti rivolti all'individuazione di eventuali anomalie od errori nel sistema di controllo e prestando attenzione anche alla presa in confidenza da parte dell'utente delle procedure necessarie durante la messa in funzione ed alla calibrazione dei parametri con il processo reale.

Gli obiettivi della fase di simulazione, quindi, sono quelli di verificare sia l'implementazione e le funzionalità del codice di controllo quanto, allo stesso tempo, la veridicità della simulazione del processo fisico nelle varie condizioni

di carico richieste. A tale scopo risulta di grande importanza il monitoraggio costante delle condizioni di allarme.

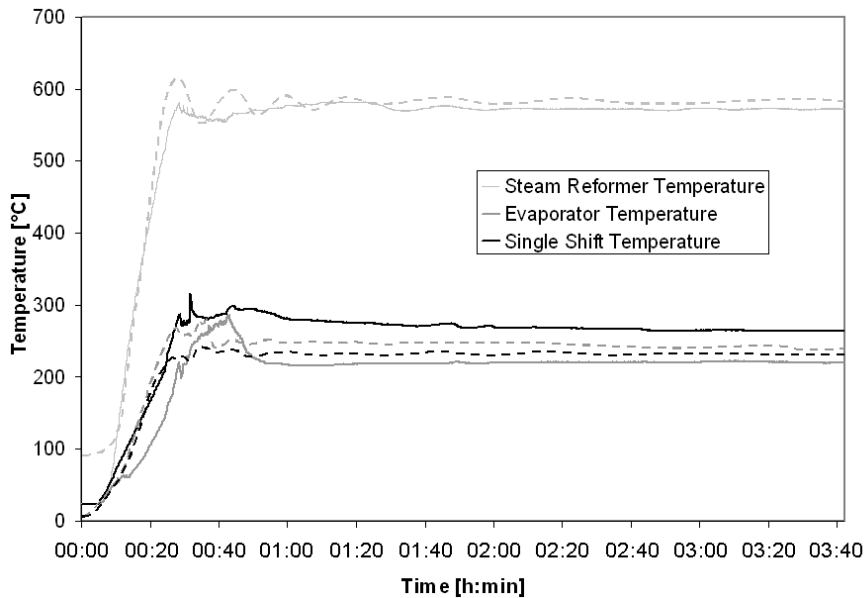


Figura 26: Principali temperature durante la fase di avvio del sistema [8].

I test effettuati sono stati i seguenti: funzionamento nelle condizioni di carico richieste, avviamento, spegnimento in condizioni di normale utilizzo ed in condizioni di emergenza.

Perchè tutte le fasi e le procedure sopra descritte siano applicabili, risulta chiaro come sia strettamente necessaria una grande accuratezza del modello del processo da studiare.

Nei due grafici in *Figura 26* e *Figura 27* è possibile vedere come, in questo caso, i risultati ottenuti con la simulazione del processo (linee tratteggiate) delle principali temperature del sistema produzione di gas ed i corrispettivi valori reali (linee continue) mostrino un andamento del tutto analogo.

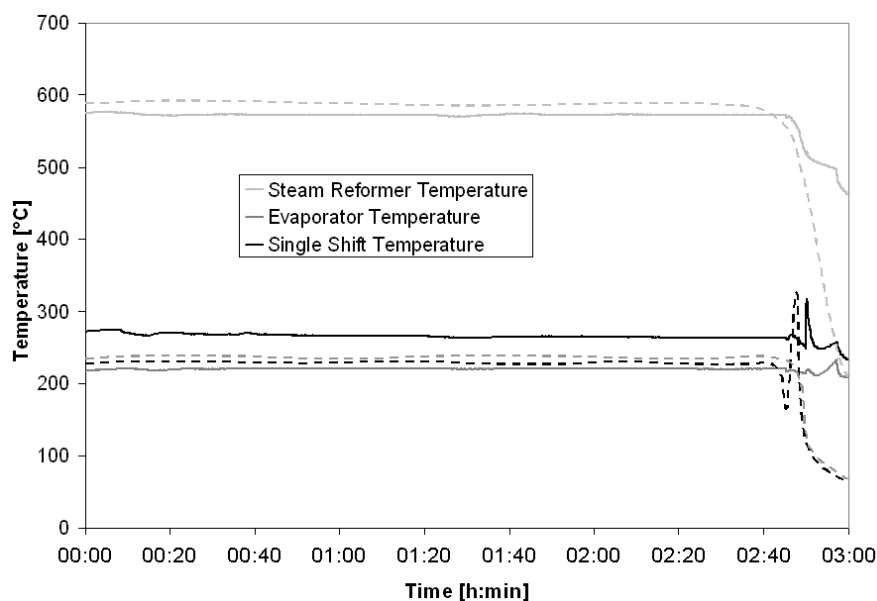


Figura 27: Principali temperature durante la fase di spegnimento del sistema [8].

Durante i test eseguiti per validare il codice di controllo con il processo reale sono naturalmente necessarie calibrazioni dei numerosi parametri. Questo può essere fatto, ad esempio, molto semplicemente utilizzando direttamente Simulink, attraverso l'uso del codice sviluppato (host computer) e connettendolo in "external mode" con il sistema di controllo reale (xPC Target Box).

Un altro modo, nonché quello adottato in questo progetto, sfrutta la possibilità offerta dall'interfaccia xPC API per creare una piattaforma di controllo utilizzando un software diverso da quello di partenza.

In questo caso, ad esempio, il software LabVIEW (prodotto National Instrument) risulta essere di gran lunga più performante per quanto riguarda la semplicità di gestione dello stesso da parte dell'utente finale grazie a componenti specifiche come anche molto semplici e flessibili all'utilizzo.

In conclusione è possibile sottolineare come tutte le fasi di sviluppo e verifica esposte abbiano raggiunto gli obiettivi sperati. Il sistema di controllo

sviluppato ha reso possibile il funzionamento del processo fisico nelle condizioni espresse dalle specifiche.

Nelle prime generazioni dell'impianto la messa in funzione come pure le calibrazioni si sono svolte in laboratori interni ad un'azienda partner.

Man mano che il prototipo ha raggiunto le caratteristiche volute per effettuare i test sul campo, in parallelo e sempre nei laboratori, si è predisposto tutto il necessario per la simulazione dell'impiantistica (radiatori, tubazioni, ecc...) presente in una normale abitazione. Attraverso uno specifico software ed una apposita banca dati, si sono potute riprodurre le condizioni tipiche di utilizzo e di carico.

L'ultima generazione del prototipo (costruito in più unità identiche) è stata quindi, nella suddetta configurazione, messa in funzione, calibrata e testata sia per una sua ottimizzazione come pure per l'ottenimento delle approvazioni necessarie per essere fatta funzionare in un'abitazione privata.

Raggiunte tutte le certificazioni necessarie, il prototipo è stato quindi montato e messo in funzione in una delle abitazioni scelta per la continuazione dei test.

Tutte le operazioni adottate per lo sviluppo delle varie fasi del progetto hanno raggiunto i desideri sperati semplificando la fase di progetto e riducendo, in termini di tempo, la fase finale di messa in funzione, di calibrazione e di verifica con il sistema reale.

Questo è facilmente traducibile in una riduzione considerevole dei costi legati allo sviluppo del codice insieme ad un significativo miglioramento delle qualità generali del prodotto finale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] K.Heikrodt, P.Britz, ***“Erdgasbetriebene PEMFC-Hausenergieversorgungsanlage innovativer Beitrag zur Emmissions- und Energiereduktion”***, VDI-Verl., 2004.
- [2] Commission of the European Communities, ***“Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential”***, 2006.
- [3] Federal Chancellor Angela Merkel, ***“Policy Statement”***, German Bundestag, 1 March 2007.
- [4] U.S. Department of Energy, ***“Fuel Cell Report to the Congress”***, ESECS EE-1973, 2003.
- [5] J. Larminie, A. Dicks, ***“Fuel Cell Systems Explained”***, John Wiley & Sons.
- [6] U.S. Department of Energy, ***“Fuel Cell Handbook”***, EG&G Services, Parson.
- [7] <http://www.corrosion-doctors.org/Kinetics/Polarization.htm>.
- [8] F.Turoni, M.Mlynski, A.Sadatsakak, M.Schreiber, ***“Model based design of a controller for fuel cell systems”***, Shaker Verlag Aachen, 2005.

- [9] M. Mlynski, F. Turoni, A. Hlawenka, M. Schreiber, ***“Design, Simulation and evaluation of a domestic micro-CHP units”***, 3rd International Green Energy Conference, Sweden, 2007.
- [10] F. Turoni, A. Sadatsakak, M. Mlynski, A. Hlawenka, M. Schreiber, ***“Eutech Scientific Engineering Develops a Fuel Cell System Controller”***, MathWorks News & Notes, June 2007.
- [11] Y. Zhu, ***“Multivariable System Identification for Process Control”***, Pergamon, 2001.
- [12] Lennart Ljung. ***“System Identification – Theory for the User”***, Second Edition, 1999.
- [13] Urban Forssell, Lennart Ljung, ***“Closed-loop identification revisited”***, 1999.
- [14] Paul M.J. Van den Hof, Raymond A. de Callafon, ***“Multivariable Closed-Loop Identification: From Indirect Identification to Dual-Youla Parametrization”***, 1996.
- [15] Urban Forssell, Lennart Ljung, ***“Issues in closed-loop identification”***.
- [16] M. Mlynski, W.Ameling, ***“Scalar Fuzzy Logic / A new mathematic model for approximate reasoning”***, IEEE/EMBS, Turkey, 2001.
- [17] M. Mlynski, U.Bücken, K.Markus, R.Koos, V.Lang, W.Ameling, P.Hanrath, ***“Using Scalar Fuzzy Control for aggregation problems in knowledge based diagnosis for implantable devices”***, IEEE/EMBS, Mexico, 2003.
- [18] M. Mlynski, ***“Eine neue Methode des unscharfen Schließens für Expertensysteme”***, Ph.D. dissertation, RWTH Aachen, 2003.
- [19] M. Mlynski, F. Turoni, M. Schreiber, ***“A fuzzy controller for stabilizing fuel cell systems”***, ASME New York, 2005.

- [20] M. Mlynski, F. Turoni, M. Schreiber, “***Robust stack operation under highly transient conditions***”, Fuel Cell Conference 2007, Rochester, NY, USA, 2007.