



Università Di Pisa
Facoltà di Ingegneria

Corso di laurea Specialistica in:
INGEGNERIA DEI VEICOLI TERRESTRI

Tesi di laurea specialistica

***Modellazione e simulazione di sistemi propulsivi
basati su fuel cell a idrogeno***

RELATORI

Prof. Ing. *Massimo Ceraolo*
Dipartimento
di Sistemi Elettrici e di Automazione (DSEA)

Prof. Ing. *Roberto Gentili*
Dipartimento
di Energetica

Prof. Ing. *Luca Sani*
Dipartimento
di Sistemi Elettrici e di Automazione (DSEA)

Dott.Ing. *Giovanni Lutzemberger*
Dipartimento
di Sistemi Elettrici e di Automazione (DSEA)

CANDIDATO

Elisa Puliti

Indice

Introduzione	6
Capitolo 1	7
1.1 Incidenza del trasporto sull'inquinamento atmosferico	7
1.1.1 Le principali emissioni inquinanti	7
1.1.2 Il problema CO ₂	9
1.2 Pregi dei veicoli elettrici	11
1.2.1 Analisi Well to Wheel	11
1.2.2 Tipologia di veicoli elettrici	13
1.2.3 Integrabilità nel traffico urbano	14
1.3 Interventi tesi alla diffusione dei veicoli alternativi	15
Capitolo 2	16
2.1 Generalità	16
2.1.1 Il problema dell'emissioni dei gas serra	16
2.1.2 La scelta dell'Idrogeno	17
2.1.3 Cos'è e come si produce l'Idrogeno	18
2.1.3.1 Produzione da fonti fossili	19
2.1.3.2 Produzione da fonti rinnovabili	21
2.1.4 Stoccaggio e distribuzione	23
2.1.5 Compressione	23
2.1.6 Liquefazione	24
2.1.7 Accumulo chimico	24
2.1.8 Distribuzione	25
2.1.9 Utilizzo	26

2.2 Celle a elettrolita polimerico (PEMFC)	27
2.2.1 Come funziona una cellula a combustibile	28
2.2.2 Sicurezza	31
2.2.3 Ricerca e sviluppo	32
2.2.3.1 I paesi esteri	32
2.1.3.2 Italia	33
2.3 I veicoli a Idrogeno	34
2.3.1 Utilizzo delle celle a combustibile nella trazione	34
2.3.2 A quando il veicolo ad Idrogeno?	36
Capitolo 3	39
3.1 Sistema di accumulo al Litio	39
3.1.1 Principio di funzionamento	39
3.1.2 Aspetti costruttivi	42
3.2 Parametri caratteristici	42
3.2.1 Forza elettromotrice, capacità, rendimento	42
3.2.2 Valori tipici	47
3.3 Controllo e gestione	48
3.3.1 Monitoraggio di tensione e corrente	48
3.3.2 Sicurezza	50
3.4 Ultimi sviluppi	51
3.4.1 Pericolo d'incendio	51
3.4.2 Sicurezza dei veicoli con batterie al Litio-crash test	51
3.4.3 Costi	52
3.4.4 Autonomia	52

Capitolo 4	54
4.1 Modello matematico dell'Apparato propulsivo	54
4.1.1 Struttura	54
4.1.2 Principio di funzionamento del modello	56
Capitolo 5	58
5.1 Dimensionamento nuova configurazione	58
5.1.1 Dimensionamento stack e sistema di accumulo	58
Capitolo 6	64
6.1 Gestione energetica a filtro di potenza	64
6.2 Nuova gestione energetica con fattore moltiplicativo K	70
6.3 Configurazioni esaminate	76
6.3.1 Dettagli esaminati	77
6.3.1.1 Gestione energetica a filtro di potenza	77
6.3.1.2 Gestione energetica con fattore moltiplicativo K	80
6.4 Risultati	82
Capitolo 7	90
7.1 Nuovo modello motore elettrico	90
7.1.1 Blocco dinamica del veicolo	93
7.1.2 Blocco termico	94
7.1.3 Blocco energia e rendimento	95

7.2 Validazione del modello	95
<i>Capitolo 8</i>	97
8.1 Confronto tra modelli di stack	97
<i>Appendice</i>	99
<i>Bibliografia</i>	108
<i>Ringraziamenti</i>	110

Introduzione

La sensibilizzazione verso gli aspetti ambientali, dovuti ad un inquinamento purtroppo sempre più alto, e dato lo sviluppo tecnologico sempre più spinto e l'aumento della domanda del fabbisogno energetico da parte di paesi un tempo non così industrializzati, stanno indirizzando Enti pubblici, privati e perfino l'Unione Europea, ad individuare processi e tecnologie con l'obiettivo di ridurre l'impatto che le attività dell'uomo hanno sull'ecosistema. Sebbene il settore dei trasporti non incida in modo esclusivo sull'inquinamento globale, su di esso si riversano i maggiori interessi promuovendo la realizzazione di veicoli alternativi. I più promettenti in questo senso, proprio perché a emissioni zero, sono i veicoli elettrici nei quali l'energia necessaria per la propulsione viene fornita da sistemi in cui non è presente un motore a combustione interna, argomento che verrà affrontato nei capitoli successivi.

A tale proposito l'attenzione dei progettisti è orientata all'utilizzo, in maniera esclusiva o combinata, di accumulatori al Litio e di sistemi di generazione elettrica a celle a combustibile. E' opportuno però che lo sviluppo di questi veicoli, che possono rispondere alle effettive esigenze di mobilità in ambito urbano, sia sempre più incentivato per tentare di arginare gli alti costi e le difficoltà tecniche realizzative.



Figura 1.1: Panda Fiat ad idrogeno

Capitolo 1

1.1 Incidenza del trasporto sull'inquinamento atmosferico

La maggior parte dell'energia utilizzata dalle moderne società industriali viene prodotta mediante l'impiego di combustibili fossili in impianti termici, i quali aspirano aria dall'atmosfera scaricandovi poi i prodotti della combustione e alterandone così l'equilibrio naturale. Ciò apporta danni per l'ecosistema, infatti oltre alla variazione di concentrazione dei gas già presenti, aspetto presumibilmente responsabile dei mutamenti climatici avvenuti nell'ultimo secolo, si assiste alla crescente immissione di sostanze nocive nell'ambiente sotto forma di particelle e specie chimiche reattive.

I motori installati sui mezzi di trasporto costituiscono la principale sorgente d'inquinamento atmosferico, per quanto riguarda gli strati di aria più prossimi al terreno, soprattutto nelle aree urbane ad intenso traffico, poiché nei gas di scarico sono contenuti diversi inquinanti, derivanti da processi di ossidazione e combustione incompleta. Nei prodotti di combustione è presente inoltre una certa concentrazione di anidride carbonica e, come sarà chiarito più avanti, con un grado di tossicità non equiparabile a quello delle altre sostanze.

1.1.1 Le principali emissioni inquinanti

I principali inquinanti atmosferici sono gli ossidi di zolfo (SO_x) ed azoto (NO_x), i composti organici volatili¹(COV), il metano (CH_4), l'ossido di carbonio (CO), l'ammoniaca (NH_3) e le polveri sottili (PM_x). Per capire meglio l'effetto delle principali emissioni è possibile fare riferimento ad alcuni parametri ottenuti dalla combinazione di dati relativi ai singoli inquinanti. Ad esempio, si possono prendere in considerazione le sostanze in grado di favorire la formazione di ozono troposferico²(O_3), gas che a differenza dell'azoto della stratosfera, è considerato nocivo per la salute dell'uomo: si tratta in particolare di ossido di

¹ Anche noti come VOC (Volatile Organic Compounds)

² Conosciuto anche come smog fotochimico, è concentrato nello strato di atmosfera prossimo al suolo

carbonio (CO), ossido di azoto (NO), composti organici volatili (COV) e metano (CH₄) i cui contributi nella generazione di O₃ sono valutati in maniera ponderata attraverso una espressione del tipo:

$$E_{O_3} = \sum W_i E_i$$

dove:

E_{O₃} = emissioni di gas responsabili della formazione di ozono troposferico

W_i = peso dell'inquinante i-esimo nella formazione di ozono troposferico

E_i = emissione dell'inquinante i-esimo

Il contributo dei singoli inquinanti è valutato secondo i seguenti coefficienti di ponderazione W_i: NO=1.22; COV=1; CO=0.11; CH₄=0.014.

Nella tabella 1.1 si riportano le emissioni delle sostanze che concorrono a produrre ozono ed inquinamento nei Paesi dell'unione Europea, dati raccolti nell'ambito dell'EPER, *European Pollutant Emission Register*, per la prevenzione ed il controllo dell'inquinamento:

	Air		
	Number	Emission	Threshold Air
CH4	1,287	2,277,828,000	100,000
CO	495	3,983,349,400	500,000
CO2	1,570	1,513,039,000,000	100,000,000
HFCs	97	975,279	100
N2O	418	146,425,200	10,000
NH3	3,016	111,269,900	10,000
NMVOG	793	567,161,000	100,000
NOx	2,161	2,958,836,360	100,000
PFCs	29	384,589	100
SF6	23	63,045	50
SOx	1,321	4,590,383,000	150,000
Total - Nitrogen	-	-	-
Total - Phosphorus	-	-	-
As and compounds	238	31,270	20
Cd and compounds	269	24,058	10
Cr and compounds	222	222,805	100
Cu and compounds	183	137,746	100
Hg and compounds	357	24,439	10
Ni and compounds	480	492,785	50
Pb and compounds	288	629,578	200
Zn and compounds	360	1,792,396	200
Chloroalkanes (C10-13)	-	-	-
Dichloroethane-1,2 (DCE)	46	3,076,680	1,000
Dichloromethane (DCM)	151	6,025,650	1,000
Halogenated organic compounds	-	-	-
Hexachlorobenzene (HCB)	3	84	10
Hexachlorobutadiene (HCBd)	-	-	-
Hexachlorocyclohexane(HCH)	-	-	-
PCDD+PCDF (dioxins+furans)	89	1	-
Pentachlorophenol (PCP)	1	469	10
Tetrachloroethylene (PER)	34	754,250	2,000
Tetrachloromethane (TCM)	20	103,974	100
Trichlorobenzenes (TCB)	2	72	10
Trichloroethane-1,1,1 (TCE)	2	776	100
Trichloroethylene (TRI)	106	2,704,144	2,000
Trichloromethane	37	236,014	500
Benzene	220	3,968,630	1,000
Benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes	-	-	-
Brominated diphenylether	-	-	-
Organotin - compounds	-	-	-
Phenols	-	-	-
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	116	342,217	50
Total organic carbon (TOC)	-	-	-
Chlorides	-	-	-
Chlorine and inorganic compounds	403	37,574,900	10,000
Cyanides	-	-	-
Fluorides	-	-	-
Fluorine and inorganic compounds	236	10,289,723	5,000
HCN	34	136,618	200
PM10	554	149,508,655	50,000

Tabella 1.1: Estratto delle emissioni di gas inquinanti europee, dati EPER 2004. Valori sono espressi in migliaia di tonnellate

Altro aspetto che impatta negativamente sull'ecosistema, è quello legato alla formazione di piogge acide, causate dall'interazione tra anidride solforosa (SO_2), biossido di azoto (NO_2) ed ammoniaca (NH_3), con le molecole di acqua presenti nell'aria.

E' possibile quindi valutare le emissioni di sostanze responsabili dell'acidificazione delle piogge nei Paesi dell'Unione Europea suddivise per settore, sempre calcolate in maniera ponderata con una espressione analoga a quella del caso precedente.

Inoltre ci sono le emissioni di polveri sottili (PM_x), ossia una miscela di particelle solide o liquide che per le ridotte dimensioni, restano sospese in aria. E' un inquinante fortemente legato al traffico nelle aree urbane: oltre il 74% proviene infatti dal settore trasporti, il 16% dal riscaldamento e solo il 10% dall'industria.

1.1.2 Il problema CO_2

Tra gli inquinanti menzionati nel paragrafo precedente non è stata inclusa l'anidride carbonica (CO_2). Non è infatti corretto considerarla al pari delle sostanze fin qui considerate poiché, oltre ad essere presente nell'atmosfera a prescindere dalle attività umane, i suoi effetti sull'ecosistema e sull'uomo non appaiono molto chiari e definite.

Se infatti polveri sottili, ossido di carbonio e composti organici volatili, possono essere posti in stretta correlazione con patologie cardiovascolari o malattie del sistema respiratorio, alla CO_2 è attribuita la generica responsabilità del riscaldamento dell'atmosfera terrestre a causa dell'aumento dell'effetto serra³. Non mancano, tuttavia, pareri discordanti infatti, secondo i quali, l'incremento di CO_2 sarebbe piuttosto uno degli effetti del riscaldamento globale avvenuto a causa di complesse trasformazioni dell'attività solare.

Nell'ambito dell'attività svolta non sono state ulteriormente approfondite le diverse posizioni al riguardo, ma si vuole comunque ribadire che il ruolo della CO_2 sui mutamenti climatici costituisce un problema aperto. A livello mondiale (conferenza di Kyoto, 1997) è nato l'impegno di ridurre le emissioni di anidride carbonica nell'ambito dei processi produttivi industriali. Si deve ricordare però che anche altre sostanze incidono

³ L'effetto serra è un fenomeno che consiste nel riscaldamento del pianeta per effetto dell'azione della CO_2 e di altri gas: questi ultimi assorbono le radiazioni infrarosse provenienti dalla superficie terrestre impedendo loro di disperdersi nello spazio; in questo modo, restando confinate negli strati dell'atmosfera prossimi al suolo, la temperatura media del pianeta tende ad aumentare.

sull'aumento dell'effetto serra ed in particolare il metano (CH_4) ed il protossido di azoto (N_2O), il cui contributo viene valutato in termini di equivalenza rispetto alla CO_2 .

Nella figura 1.2, si può notare come ne sia suddivisa la produzione in ambito industriale, nei paesi dell'Unione Europea a 25:

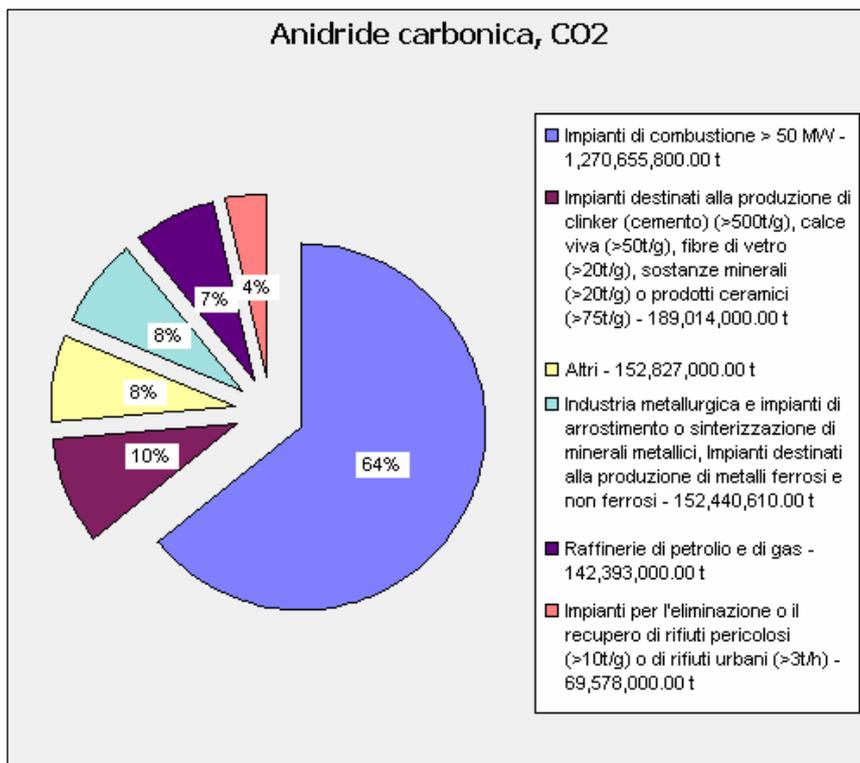


Figura 1.2: Emissioni di CO₂ nell'atmosfera per attività industriale, EU25,2004

1.2 Pregi dei veicoli elettrici

Adottando una definizione spesso utilizzata nella pratica, un veicolo elettrico è un veicolo in cui la propulsione è effettuata mediante uno o più motori elettrici, i quali prelevano energia da un sistema che non contiene motori a combustione interna. Pregio fondamentale di questi veicoli è di non presentare emissioni nel punto di utilizzo (per l'inquinamento sarà quindi particolarmente significativa solo la modalità di preparazione a monte dell'energia elettrica utilizzata) e, oltre ad essere più silenziosi dei veicoli tradizionali, hanno una perfetta integrabilità nel traffico cittadino ed una soddisfacente affidabilità.

In Europa esistono applicazioni confinate nell'ambito urbano che prevedono percorrenze di poche decine di chilometri al giorno e che sono perciò compatibili con la bassa autonomia dei veicoli elettrici (anche di quelli tecnologicamente più poveri).

E' auspicabile per il futuro un aumento dei volumi di mercato di questi veicoli in modo da ottenere un abbattimento dei prezzi: ancora oggi infatti, risultano più costosi degli altri per la limitata scala di produzione che non giustifica investimenti per produzioni più economiche ed ottimizzate.

1.2.1 Analisi catena produttiva - Well to tank

Per valutare l'impatto ambientale di un veicolo è sempre opportuno riferirsi alle emissioni globali, dalla sorgente alle ruote (Well to tank) infatti, considerando perciò sia le emissioni rilasciate durante l'utilizzo del mezzo, sia quelle relative alla preparazione del combustibile o dell'energia da fornire.

Si attua quindi un'analisi di tipo **Well to Wheel**, dalla sorgente di energia primaria alle ruote, suddivisa in un primo stadio **Weel to Tank** (dalla sorgente al serbatoio) ed in un secondo **Tank to Wheel** (dal serbatoio alle ruote).

E' evidente che, nel caso di una vettura con motore a combustione interna (ICE), i consumi energetici e le emissioni saranno più significativi durante l'impiego del veicolo; mentre, per un veicolo elettrico alimentato a batterie, si dovrà valutare il mix di fonti primarie con le quali l'energia elettrica è stata prodotta.

E' da precisare, inoltre, che la produzione di energia elettrica avviene lontano dai centri urbani e gli inquinanti vengono immessi nell'atmosfera attraverso camini di grande altezza (aspetto che ne favorisce una certa diluizione prima della ricaduta al suolo).

Se si effettua un confronto tra le emissioni globali⁴ di un veicolo con motore endotermico con quelle di un veicolo elettrico, la cui ricarica venga cioè effettuata con energia elettrica prodotta impiegando il mix di fonti energetiche primarie, si scopre che i veicoli a batteria appaiono preferibili sia per quanto riguarda gli inquinanti tradizionali (CO, HC⁵, NO_x, SO₂, PM) sia per i gas serra. Soltanto per l'anidride solforosa il livello risulta più alto di quello dei veicoli termici, ma la concentrazione di SO₂ in ambito urbano rimane comunque molto al di sotto dei limiti consentiti. E' da considerare inoltre che le emissioni dei veicoli endotermici nel traffico reale sono più elevate di quelle registrate nei cicli di prova standard, mentre gli automezzi elettrici risentono meno delle condizioni di impiego.

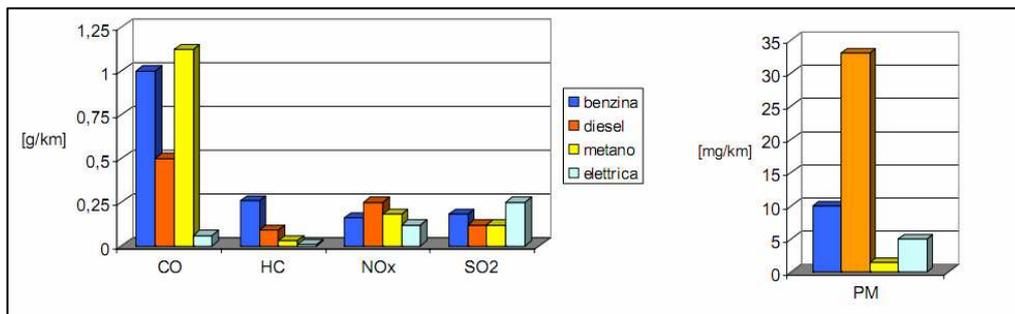


Figura 1.3: Emissioni globali nell'atmosfera

La naturale evoluzione degli impianti europei di generazione elettrica condurrà poi nel medio termine a un ulteriore miglioramento dell'efficienza ambientale ed energetica rispetto ai livelli attuali, considerando anche l'integrazione di fonti energetiche rinnovabili, come l'eolico ed il solare, come riportato in figura 1.4:

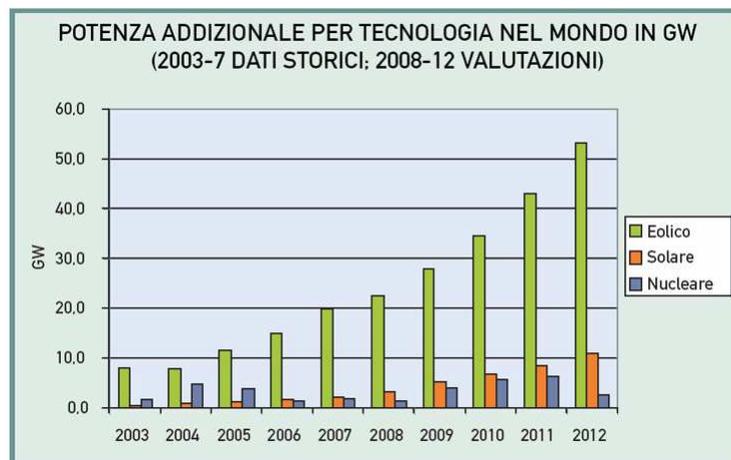


Figura 1.4: Potenza aggiuntiva per tecnologia nel mondo in [GW]

⁴ Comprensive cioè anche della fase di preparazione dell'energia

⁵ Idrocarburi incombusti, rientrano tra i composti organici volatili COV

La quantità di inquinanti e di gas serra che possono essere emessi da un veicolo durante il suo impiego è regolamentata all'interno delle Direttive europee, EURO IV, qui di seguito riportata nella tabella 2, attualmente in vigore:

	<i>CO</i> [g/km]	<i>HC</i> [g/km]	<i>NOx</i> [g/km]	<i>PM</i> [g/km]	<i>CO2</i> [g/km]
<i>Benzina</i>	1	0,1	0,08	/	220
<i>Gasolio</i>	0,5	0,05	0,25	0,025	170

Tabella 1.2: Limiti emissioni inquinanti direttiva europea EUROIV

1.2.2 Tipologia di veicoli elettrici ed ibridi

Nel campo dei veicoli elettrici non esiste una terminologia uniforme tra gli operatori. Una scelta adottata nella pratica è quella di considerare come veicolo elettrico (EV, Electric Vehicle), come un veicolo in cui la propulsione è effettuata mediante uno o più motori elettrici, i quali prelevano energia da un sistema che non contiene motori a combustione interna (ICE, Internal Combustion Engine). Per veicolo ibrido (HEV, Hybrid Electric Vehicle) si intende invece un veicolo in cui è interessato al flusso di potenza sia un motore elettrico che un motore a combustione interna (ICE).

Esistono definizioni più precise tecnicamente, meno utilizzate nella pratica ma che inquadrano più razionalmente la vasta tipologia di veicoli elettrici oggi esistente. Gli EVs (Electric Vehicles) infatti vengono divisi tra **PEVs** (Pure Electric Vehicles) e **HEVs** (Hybrid Electric Vehicles): nei primi sono presenti uno o più motori elettrici che forniscono potenza di propulsione in modo esclusivo, prelevando energia da una sola sorgente; nei secondi la potenza di propulsione proviene da più fonti indipendenti. In quest'ultima categoria è presente un'ulteriore distinzione tra ibridi serie (**SHEV**), in cui la potenza meccanica è fornita esclusivamente dal motore elettrico, e ibridi di tipo parallelo (**PHEV**), in cui la potenza meccanica viene fornita da più sistemi di conversione. Si noti che, secondo le ultime definizioni riportate, un veicolo dotato di un sistema di generazione a celle a combustibile (FCEV, Fuel Cell Electric Vehicle) è di tipo HEV se contiene un sistema di accumulo, PEV se l'accumulo è assente. Nei successivi capitoli è a quest'ultima classificazione che si farà riferimento, sintetizzata nella figura 1.5 seguente:

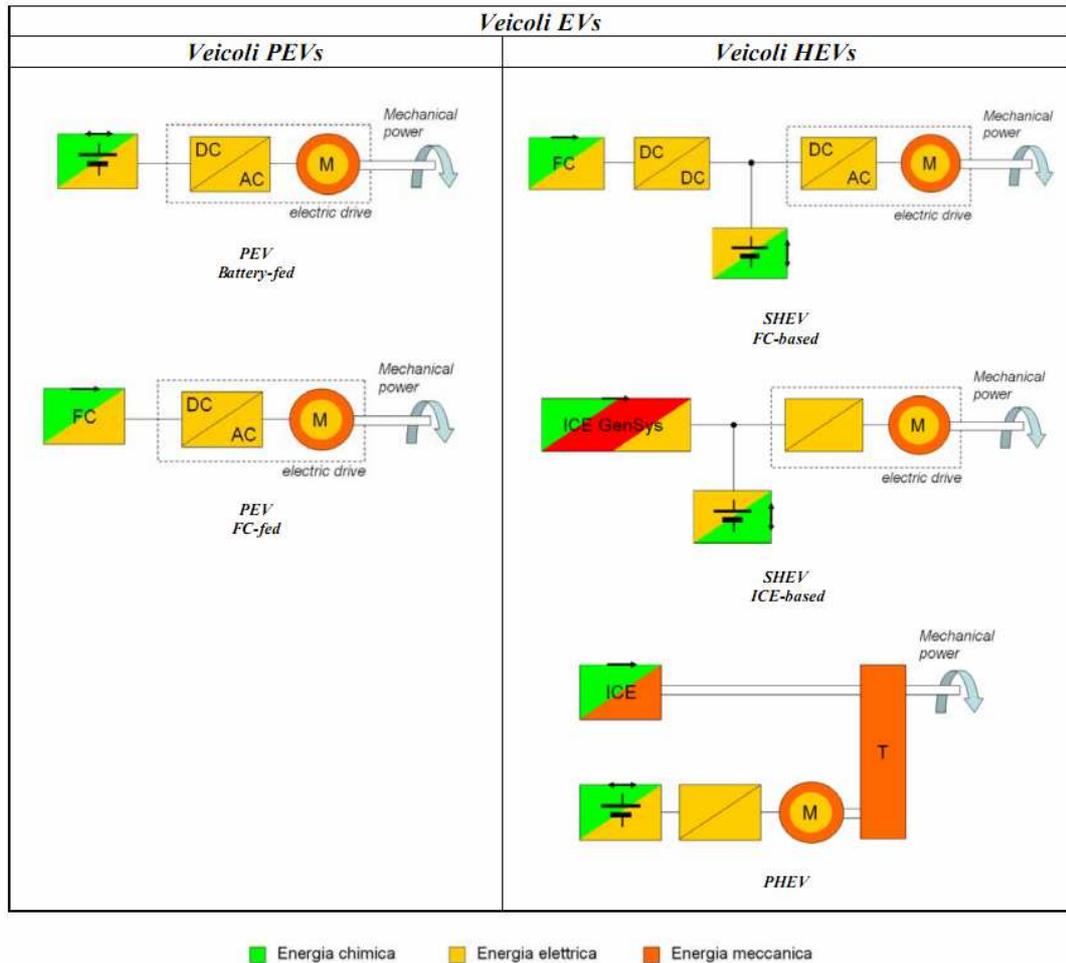


Tabella 1.4: Nomenclatura veicoli elettrici ed ibridi

1.2.3 Integrabilità nel traffico urbano

Uno degli aspetti più sentiti a livello collettivo che frenano la diffusione dei veicoli elettrici a batteria è quello legato alla scarsa autonomia; infatti con i moderni accumulatori al Litio si raggiungono percorrenze nell'ordine dei 150-200 km, che scendono a 70-75 km per i veicoli più tecnologicamente poveri della precedente generazione. Da un recente studio europeo si è però constatato che ben il 75% delle percorrenze giornaliere a bordo delle automobili sono inferiori ai 50 km, dunque perfettamente compatibili con le prestazioni dei veicoli elettrici.

1.3 Interventi tesi alla diffusione dei veicoli alternativi

Gli interventi rivolti alla diffusione dei veicoli elettrici dovranno essere tesi al miglioramento delle prestazioni, della velocità, dell'autonomia ed alla riduzione dei costi di acquisto. I potenziali acquirenti hanno infatti attualmente la percezione di compiere una scelta costosa e limitante, anche se socialmente buona, destinata a rimanere però isolata, risultando quindi inutile: la mancata assunzione di responsabilità a livello collettivo rende cioè vano lo sforzo individuale. L'industria d'altra parte, non ricevendo stimoli da parte della domanda, non è messa in condizione di muoversi verso una riduzione significativa dei costi di produzione, sarebbe pertanto auspicabile un intervento massiccio da parte degli enti pubblici e governi in grado di modificare il quadro attuale utilizzando tutti gli strumenti legislativi, economici, fiscali, regolamentativi a disposizione. In questo senso si dovrebbero applicare delle tassazioni differenziate, creare delle aree privilegiate, abolire ogni sorta di limitazione verso l'impiego e la diffusione di questi veicoli. Sarebbe tra l'altro opportuno diffondere la conoscenza di queste nuove tecnologie attraverso sistemi di car sharing, e promuovere campagne di comunicazione tese a far diventare l'auto ecologica un vero e proprio status symbol.

Capitolo 2

2.1 Generalità

La continua crescita della popolazione mondiale e la naturale aspirazione dei paesi in via di sviluppo a raggiungere standard economici e di qualità della vita vicini a quelli dei paesi industrializzati, sono le principali cause della crescita inarrestabile della domanda di energia e del contemporaneo aumento delle emissioni di gas serra, prima fra tutte l'anidride carbonica. Soddisfare tale domanda, mantenendo questi gas a livelli non pericoloso per l'ambiente e riducendo così il rischio di cambiamenti climatici nel medio termine (oltre che, naturalmente, garantire l'approvvigionamento energetico), rappresenta la sfida tecnologica del nuovo secolo.

Una sfida che può essere vinta solo con l'aumento dell'efficienza dei sistemi e la contemporanea riduzione del consumo di idrocarburi; con l'espansione dell'impiego di fonti a basso o nullo contenuto di carbonio, quali gas naturale, rinnovabili, nucleare; con la separazione della CO₂ ,prodotta nella trasformazione dei combustibili fossili ed il confinamento della stessa; con l'aumento infine, del potenziale di assorbimento della stessa CO₂ da parte dell'ecosistema.

Un tale scenario dovrebbe idealmente essere basato su un vettore ⁽¹⁾ energetico con le seguenti caratteristiche:

- Di impatto ambientale, sia globale che locale, quasi nullo;
- Producibile da più fonti energetiche primarie, tra loro intercambiabili e disponibili su larga scala, anche in futuro;
- Distribuite preferenzialmente attraverso una rete;⁶

2.1.1 Il problema dell'emissioni dei gas serra

Il principale responsabile dell'effetto serra, è l'anidride carbonica CO₂ , prodotto finale dell'uso dei combustibili fossili, nella generazione di energia termica, meccanica ed elettrica.

⁽¹⁾ Vettore energetico: tutto ciò da cui si può ricavare energia utile, mediante conversione di fonti energetiche primarie (es.:carbone, elettricità, benzina,ecc.)

All'inizio del secolo scorso, la concentrazione della CO₂ nell'aria, era pari a 300 ppm (parti per milione). Ora è circa 380 ppm.

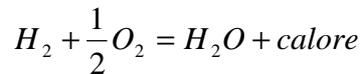
La combustione è il maggior responsabile delle emissioni di gas serra (quasi l'80% in Italia). A livello globale circa il 30% delle emissioni di CO₂ in atmosfera, è causato dai trasporti.

Le previsioni dei consumi di energia per il prossimo secolo, fanno prevedere un continuo aumento delle emissioni di CO₂ e della sua concentrazione in atmosfera, a meno di sostanziali cambiamenti del sistema energetico; tuttavia, in particolare per i trasporti, oltre a ridurre drasticamente l'uso dell'automobile, si può cercare di intervenire sull'efficienza dei veicoli o introducendo combustibili più puliti.

2.1.2 La scelta dell'idrogeno

L'idrogeno è un vettore in grado di soddisfare i requisiti precedentemente indicati; infatti:

- 1) È un gas brucia nell'aria secondo la semplice reazione:



dando quindi come unico prodotto di reazione, acqua pura;

- 2) Può essere prodotto sia da fonti fossili, sia da fonti rinnovabili, sia da fonte nucleare;
- 3) Può essere distribuito in rete abbastanza agevolmente compatibilmente con gli usi finali e con lo sviluppo delle tecnologie di trasporto e di stoccaggio;
- 4) Può essere impiegato in diverse applicazioni (produzione di energia elettrica centralizzata o distribuita, generazione di calore, trazione), con un impatto locale nullo o estremamente ridotto.

Sono indubbi i vantaggi energetici e soprattutto ambientali che conseguirebbero dall'uso dell'idrogeno, nei particolari sistemi elettrochimici delle celle a combustibile, che permettono la trasformazione diretta dell'energia chimica contenuta nel gas in energia elettrica senza altre emissioni dannose.

Si può dire quindi, che l'idrogeno rappresenta in prospettiva, un componente ideal di un futuro sistema energetico sostenibile, costituendo un incentivo verso l'impiego diffuso delle fonti rinnovabili (e di un "nuovo eventuale nucleare"), ma già nel breve-medio termine, può rendere i combustibili fossili compatibili con le esigenze ambientali.

Lo sviluppo come vettore energetico però, richiede la predisposizione anche di una vasta gamma di infrastrutture integrate, se non altro per rendere l'impiego economico ed affidabile in tutte le varie fasi della catena tecnologica (produzione, sconfinamento dell'anidride carbonica generate nel processo, trasporto, accumulo, usi finali). Ad esempio, si pensi solo che nell'applicazione dell'autotrazione, occorrerebbe sviluppare non solo le celle a combustibile più adatte, ma anche serbatoi per equipaggiare i veicoli, sistemi di trasporto e reti di distribuzione paragonabili a quelli dei carburanti tradizionali.

Tutto ciò, ovviamente, costituisce una grossa sfida per i prossimi anni, che tuttavia non potrà non avere benefiche ricadute-intermini economici ed occupazionali- immediatamente nel comparto della ricerca e sviluppo ed a seguire, sull'intera industria manifatturiera di ogni paese.

2.1.3 Cos'è e come si produce l'idrogeno

L'idrogeno, l'elemento più leggero ed abbondante nell'universo, è assai raro sulla terra allo stato elementare, a causa della sua estrema volatilità-si trova, ad esempio, nelle emanazione vulcaniche, nelle sorgenti petrolifere, nelle fumarole- ma viceversa è molto diffuso sotto forma di composti (acqua, idrocarburi, sostanze minerali, organismi animali e vegetali), e può quindi essere prodotto a partire da diverse fonti. L'interesse per il suo impiego come combustibile, sia per applicazioni stazionarie che per la trazione, deriva dal fatto che l'inquinamento prodotto è quasi nullo; infatti, come già detto, se usato in un sistema a combustione, produce vapor d'acqua e tracce di ossidi di azoto, oppure solo vapor d'acqua, se utilizzato con sistemi elettrochimici con celle a combustibile.

Rispetto agli altri combustibili, l'idrogeno è un gas incolore, inodore, non velenoso, estremamente volatile e leggero: presenta quindi; un ridotto contenuto energetico per unità di volume, mentre ha un più alto contenuto di energia per unità di massa. Per fare un confronto con un altro combustibile, ad esempio il gasolio, possiamo dire che un litro di gasolio, come contenuto energetico, equivale a:

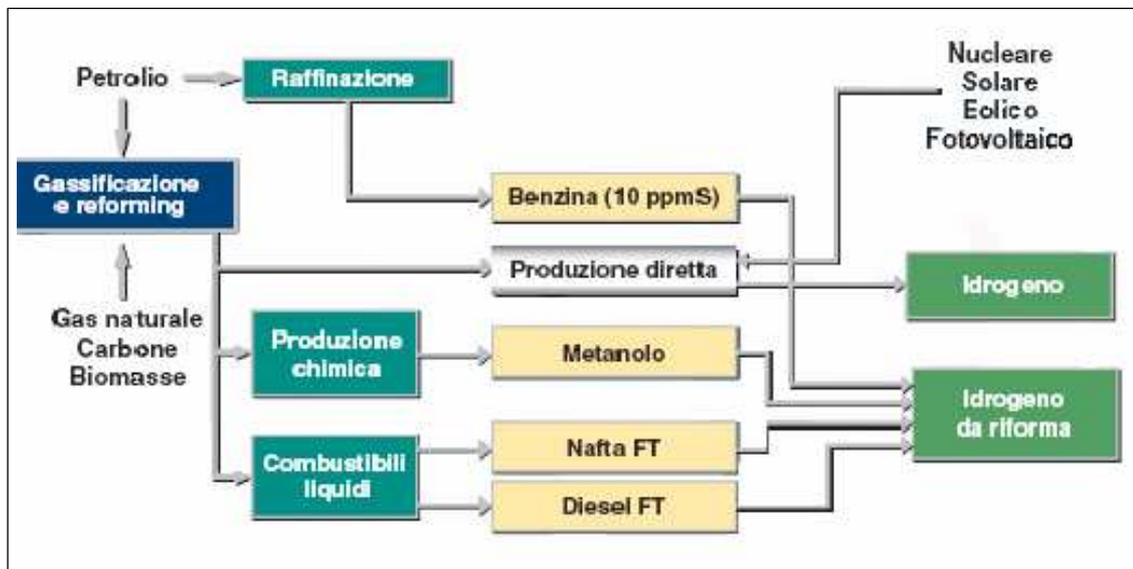
- 3,12 m³ di idrogeno gassoso (in condizioni standard)
- 4,13 l di idrogeno liquido

dove però la combustione dell'idrogeno può essere realizzata con un'efficienza più alta.

A fronte di queste qualità energetiche e soprattutto ambientali, tuttavia l'introduzione dell'idrogeno come combustibile -e più in generale come vettore energetico- richiede che siano messe a punto le tecnologie necessarie per agevolare la produzione, il trasporto, l'accumulo e l'utilizzo. A titolo di esempio, solo per la liquefazione a -253°C , occorrono particolari tecnologie oltre che la predisposizione di speciali container per il trasporto.

Per quanto riguarda la produzione, ricordiamo che le fonti primarie di partenza, possono essere sia fossili che rinnovabili, in modo da contribuire alla diversificazione ed all'integrazione tra le diverse tipologie di energia. Nella figura seguente, sono schematizzati alcuni metodi di produzione dell'idrogeno:

Figura 2.1: Alcune metodologie di produzione dell'idrogeno



2.1.3.1 Produzione da fonti fossili

Le tecnologie di produzione dell'idrogeno, a partire dai combustibili fossili, sono mature e ampiamente utilizzate, anche se vanno ottimizzate da un punto di vista economico, energetico e di impatto ambientale. Dei circa 500 miliardi di Nm^3 di idrogeno prodotti annualmente a livello mondiale, circa 190 miliardi rappresentano un sottoprodotto dell'industria chimica (ad esempio, dagli impianti cloro-soda), mentre la maggior frazione deriva da combustibili fossili, gas naturale ed olio pesante, attraverso processi di reforming e di ossidazione parziale. Tali processi, prevedono la produzione del gas, attraverso successivi stadi di raffinazione e di frazionamento delle molecole degli idrocarburi, fino alla completa eliminazione del carbonio. Con questa linea oggi, viene prodotta una grandissima quantità di idrogeno, tutta

quella consumata sul mercato della chimica dei fertilizzanti di sintesi e nella metallurgia dell'acciaio. Il processo più diffuso, “*steam reforming*”, reazione a caldo del materno con vapore ad 800°C, in modo da ossidare il carbonio e liberare idrogeno della molecola con emissione di anidride carbonica secondo la reazione



è tecnicamente molto ben sperimentato, e viene realizzato industrialmente con reattori di grosse capacità, dell'ordine di 100.000Nm³/h. Unità molto più piccole, realizzate specificatamente per l'uso sui veicoli o per impianti di generazione distribuita di piccola taglia, sono attualmente in via di sviluppo, soprattutto per l'utilizzo in sistemi con celle a combustibile.

La produzione da fonti fossili, però, ha l'inconveniente di dar luogo- come prodotto di scarto- all'emissione di grandi quantità di CO₂, cosicché l'idrogeno- pur utilizzabile in modo pulito- non è comunque incolpevole a causa dell'inquinamento prodotto nel ciclo di lavorazione.

Per ovviare a ciò, occorrerebbe raccogliere e confinare ⁽²⁾ la CO₂ prodotta nei grossi impianti, sfruttando l'esperienza in materia, delle compagnie petrolifere. Per queste, si può anche ipotizzare una parziale riconversione, che consenta di produrre idrogeno dagli idrocarburi, idrogeno che verrebbe poi utilizzato negli autoveicoli (conservando ovviamente il profitto per le compagnie).

Dal punto di vista ambientale, questa soluzione, ha il vantaggio di evitare le emissioni di CO₂ di una quantità considerevole di veicoli sparsi sul territorio, concentrandole negli impianti petrolchimici, da dove però potrebbero essere catturate con opportuni filtri, trasformate in forma liquida o solida, e poi immagazzinate in giacimenti geologici profondi, e di caratteristiche adeguate che ne dovrebbero impedire la reimmissione in atmosfera. Nel nostro paese, come in altri, le opzioni principali, sono due:

- 1) pompaggio nei giacimenti esauriti di gas e petrolio;
- 2) immissione nei cosiddette acquiferi salini⁽³⁾, formazioni stabili sotterranee non altrimenti utilizzabili, ed in fondali oceanici, situati a grande profondità (oltre 1.000m sotto il livello del mare), dove la CO₂ si manterrebbe allo stato liquido, indefinitamente, a causa dell'enorme pressione ivi esistente.

⁽²⁾ Immagazzinare in giacimenti geologici per impedire la reimmissione in atmosfera.

⁽³⁾ Ammassi di rocce sedimentarie porose, permeabili e saturate di acqua.

Dal punto di vista tecnico, queste proposte- il cui sviluppo già costituisce di per sé, un programma di ampie dimensioni- sono già oggi realizzabili con qualche aggiustamento e modifica di tecnologie esistenti, in modo da consentire uno sviluppo graduale delle infrastrutture, del settore energetico, e quindi una riduzione degli inquinanti nel breve-medio termine. E' tuttavia da tener presente, che la produzione di idrogeno da combustibili fossili, deve essere considerata come una sorta di "ponte tecnologico", verso la produzione da fonti rinnovabili- soluzione più promettente nel lungo termine- in quanto lascerebbe irrisolti, in particolare i problemi economici, a causa dell'inevitabile progressivo esaurimento delle riserve di combustibili fossili, e del costo aggiuntivo del sconfinamento della CO₂.

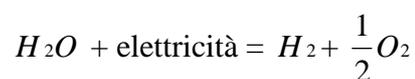
2.1.3.2 Produzione da fonti rinnovabili

Per quanti riguarda la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili- modo sostanzialmente pulito e per questo più interessante- i processi possono essere sommariamente distinti in:

- produzione da biomasse;
- produzione da acqua;

Nella produzione di idrogeno a partire da biomasse, nessuno dei processi proposti, ha ancora raggiunto la maturità industriale. Le diverse alternative (massificazione, pirolisi e successivo reforming della frazione liquida prodotta, produzione di etanolo e reforming dello stesso, produzione biologica attraverso processi basati su fenomeni di fotosintesi o di fermentazione), richiedono tutte, un impegno notevole di ricerca, sviluppo e dimostrazione, anche se a livelli diversi. Le premesse sono comunque buone, tenuto anche conto dei diversi materiali utilizzabili.

L'idrogeno può anche essere prodotto dall'acqua, scindendo la stessa nei suoi componenti (idrogeno ed ossigeno), attraverso diversi processi, tra i quali quello più consolidato è l'elettrolisi. Schematicamente, questa è rappresentata dalla seguente reazione:



Si può notare subito, che la reazione di elettrolisi ,risulta esattamente inversa a quella che avviene nelle celle a combustibile. Pertanto, l'intero processo di produzione e consumo, è ambientalmente sostenibile, purché sia disponibile una corrispondente quantità di energia elettrica pulita, in grado di alimentare il processo di elettrolisi. E' immediato pensare al sole come sorgente di questa energia, sfruttabile attraverso l'utilizzo di impianti di conversione fotovoltaica, la cui tecnologia già oggi, può essere considerata tecnicamente affidabile ed adeguata, anche se non ancora competitiva. Infatti, mediante l'uso di energia solare fotovoltaica, si può produrre idrogeno elettrolitico ed ossigeno, che poi possono essere fatti ricombinare nelle celle a combustibile, per produrre l'energia elettrica di cui abbiamo bisogno. Come prodotto finale di scarto, si genera una quantità di acqua pura, pressappoco uguale a quella di partenza, chiudendo in tal modo il ciclo, senza emissioni inquinanti. Infine, è evidente che le grandi distese oceaniche altro non sono che, enormi riserve di idrogeno: ogni kg di acqua pura, contiene 111g di idrogeno che, una volta bruciato, potrebbe produrre 3.200 kcal di energia termica. Pertanto dall'acqua, in linea di principio, sarebbe possibile estrarre tutto l'idrogeno necessario a soddisfare in modo pulito, le esigenze energetiche dell'umanità.

Il problema attualmente, è il costo. Con l'elettrolisi dell'acqua infatti, è vero che si può ottenere idrogeno praticamente puro, ma solo ad un prezzo che può diventare economicamente accettabile, in una prospettiva ancora lontana, quando le innovazioni tecnologiche potrebbero permettere un costo estremamente basso dell'energia elettrica, prodotta da fonti rinnovabili (o dal nucleare). Pertanto tale scelta non appare, allo stato attuale delle conoscenze, economicamente ed energeticamente perseguibile, se non per applicazioni particolari (ad esempio aree remote).

La dissociazione dell'acqua, può essere effettuata anche facendo uso di processi termochimici, che utilizzano calore ad alta temperatura (800-1000°C), ottenuto da fonti diverse (prima fra tutte, l'energia solare termica); sono in corso, anche in Italia, attività di ricerca e sviluppo, tese a dimostrare la fattibilità industriale di tali processi, ed il potenziale nel lungo termine sembra essere molto interessante. Altri processi, ancora allo stato di laboratorio, sono la fotoconversione che scinde l'acqua, usando organismi biologici o materiale sintetici, ed i processi fotoelettrochimici, che usano per lo stesso scopo, una corrente elettrica generata da semiconduttori.

2.1.4 Stoccaggio e distribuzione

L'idrogeno può essere trasportato ed accumulato in forma gassosa, liquida oppure assorbito su materiali speciali; ogni modalità, presenta aspetti favorevoli e svantaggi e tutte, se pur in gran parte già utilizzate, richiedono significativi sforzi di ricerca e sviluppo, per un impiego su larga scala, affidabile ed economicamente competitivo, come nel caso di una rete adeguata, per il rifornimento degli autoveicoli.

Per il trasporto della forma gassosa, si può pensare ad idrogenodotti, ed esistono esperienze significative in tal senso, ma vanno migliorate le tecnologie per il materiale da impiegare e per la compressione del gas (minore potere calorifico e quindi maggiori portate per la stessa quantità di energia). Il trasporto in forma liquida in bombole, utilizzando autocarri, presenta problematiche ancora più complesse e sembra, in prospettiva, conveniente solo per quantità limitate e percorrenze elevate.

I metodi di stoccaggio, dipendono dalle applicazioni considerate, e sono critici soprattutto per l'impiego a bordo di veicoli, richiedendo una elevata densità di energia. Esistono diverse tecnologie di accumulo dell'idrogeno, le quali comunque, devono rispondere a requisiti di efficienza, praticità ed economicità. Nessuna di queste è ad oggi pienamente soddisfacente; tuttavia, si descriveranno in seguito le modalità più promettenti, facendo riferimento alle applicazioni per l'uso di combustibile per automobili: le soluzioni possibili prevedono, la compressione del gas, la sua liquefazione ed infine, l'accumulazione su idruri metallici.

2.1.5 Compressione

Il modo più semplice ed economico per accumulare idrogeno, è utilizzarlo sotto forma di gas compresso, a pressioni di almeno 200-250 bar (ed oltre). La tecnologia risulta tuttavia non facilmente proponibile, per l'uso a bordo di auto tradizionali, a causa del peso ed ingombro dei serbatoi attualmente utilizzati, che rappresentano un limite all'autonomia e capacità di carico del veicolo.

Recentemente, notevoli progressi sono stati fatti con l'introduzione di serbatoi con struttura metallica o termoplastica rinforzata con fibre di carbonio, di vetro ed aramidiche⁽⁴⁾, che rappresentano un peso di 3-4 volte inferiore a quello dei comuni serbatoi e che permettono

⁽⁴⁾ A base di ammidi aromatiche.

di superare in parte gli inconvenienti dell'uso delle bombole tradizionali. Questi serbatoi sono in grado di operare a pressioni fino a 350bar (potenzialmente fino a 700bar), e permettono quindi, di ottenere densità di accumulo di idrogeno adeguate all'uso a bordo di veicoli. Le caratteristiche di sicurezza, sono solitamente molto elevate, grazie alla robustezza dei serbatoi ed all'introduzione di fusibili antiscoppio in caso di incendio, e di valvole di interruzione del circuito in caso di urto. Per quanto riguarda le normative di sicurezza e le licenze per usi a bordo dei veicoli, le bombole di idrogeno sono soggette a restrizioni analoghe a quelle adottate nel caso del gas naturale.

2.1.6 Liquefazione

L'idrogeno può essere immagazzinato anche in forma liquida, alla temperatura di circa -253°C. Per mantenere queste temperature, sono stati messi a punto serbatoi criogenici a doppia parete, con un'intercapedine, dove viene fatto il vuoto (serbatoi di tipo "dewar"). Questa tecnologia è ormai consolidata in Germania, dove la BMW la utilizza da oltre 15 anni su auto ad idrogeno, alimentate con motori a combustione interna.

L'accumulo in forma liquida, è forse la tecnologia che oggi meglio soddisfa, da un punto di vista teorico, le esigenze specifiche dell'autotrazione; tuttavia, anch'essa presenta dei limiti: a sfavore dell'idrogeno liquido, giocano la maggiore complessità del sistema, non solo a bordo del veicolo, ma anche a terra, per la distribuzione ed il rifornimento, ed i maggiori costi ad esso associati. Anche il costo energetico della liquefazione, è considerevole, corrispondendo a circa il 30% del contenuto energetico del combustibile, contro un valore compreso tra il 4% ed il 7%, per l'idrogeno compresso.

2.1.7 Accumulo chimico

L'idrogeno può legarsi chimicamente con diversi metalli e leghe metalliche, formando idruri, composti in grado di intrappolare idrogeno, a pressioni relativamente basse. Il gas penetra all'interno del reticolo cristallino del metallo, andando ad occupare i siti interstiziali. Tale tecnologia, permette di raggiungere densità energetiche potenzialmente maggiori dell'idrogeno compresso, e paragonabili con quelle dell'idrogeno liquido. Il volume di stoccaggio, si potrebbe ridurre di 3-4 volte, rendendo possibile l'uso nelle autovetture, mentre l'energia specifica dipende dal peso specifico del metallo di base. Le

percentuali in peso dell'idrogeno sul peso del metallo, variano dall'1% al 12,7% (idruro di litio), mentre per le comuni bombole, tale percentuale è di poco superiore all'1%.

A fronte di tali caratteristiche positive, esistono ancora numerosi problemi da superare per la realizzazione di sistemi di accumulo veramente competitivi. Ad esempio, occorre lavorare ancora per migliorare la stabilità strutturale e termica del materiale, per depurarlo dalle impurità presenti nell'idrogeno, per render compatibili temperatura e pressione, con le applicazioni previste, ecc.. Comunque, allo stato attuale, i materiali disponibili, portano a sistemi di accumulo troppo pesanti: a parità di peso, il veicolo presenta un'autonomia tre volte inferiore a quella ottenibile con idrogeno liquido o compresso con serbatoi di tipo avanzato. Sono invece indubbi, i vantaggi in termini di convenienza, compattezza, stabilità dello stoccaggio, sicurezza.

Una tecnologia recentissima ed ancora sperimentale, riguarda l'utilizzo di nanostrutture di carbonio (nanotubi e nanofibre di carbonio), scoperte all'inizio degli anni '90, che stanno dimostrando buone capacità di assorbimento dell'idrogeno, con risultati in alcuni casi, sorprendenti. Su questi materiali, sono in corso ricerche da parte di numerosi gruppi di lavoro, ma i risultati ottenuti, spesso in contrasto tra di loro, sono per il momento, difficilmente confrontabili, in quanto le esperienze sono state effettuate su campioni di materiali di diverso tipo, provati in condizioni di pressione e temperatura molto diverse tra loro. Il campo di variazione della pressione, va da pochi bar ad alcune centinaia di bar, la temperatura da 80°K ad 800°K, le percentuali di assorbimento in peso, variano da valori inferiori all'1% ad un incredibile 60%.

2.1.8 Distribuzione

A seconda delle quantità interessate, l'idrogeno può essere trasportato per mezzo di autocisterne o con idrogenodotti. Fra le due opzioni, entrambe praticabili con tecnologie attuali, esistono grosse differenze di costo, e quindi solo specifiche analisi tecnico-economiche per le singole applicazioni, possono determinare quale sia, di volta in volta, la soluzione migliore.

Tubazioni di grosse dimensioni in acciaio standard (e quindi senza requisiti specifici), hanno trasportato idrogeno in Germania, nel distretto della Ruhr, dai produttori ai consumatori, sin dal 1938, senza particolari problemi di sicurezza (le tubazioni erano provviste di sensori per possibili fughe, ed erano previste periodiche ispezioni di controllo).

D'altra parte, è utile ricordare come in Italia, per più di 70 anni, si è distribuito nelle città, senza problemi particolari, il cosiddetto "gas di città", costituito da miscele di idrogeno (50%) e monossido di carbonio (50%), dove l'elemento di maggiore pericolosità, era il monossido di carbonio, in quanto altamente tossico. Attualmente anche in città a densità di popolazione estremamente elevate, come Pechino, sono servite da reti di distribuzione di questo tipo di gas. Idrogenodotti di dimensioni significative, sono attualmente presenti in diverse nazioni: esiste una rete di circa 170km nella Francia del nord, per un totale nell'intera Europa, di più di 1500km. Il Nord America, poi, possiede più di 700km di condutture per il trasporto dell'idrogeno.

L'esperienza accumulata nel settore della distribuzione del gas, può quindi essere utilizzata in maniera molto diretta, anche per la realizzazione e l'esercizio di reti di distribuzione dell'idrogeno, grosso modo simili alle attuali reti per il gas naturale; le maggiori differenze, potrebbero risiedere nei materiali utilizzati (alcuni acciai, tipo quelli al cromo ed al molibdeno, hanno migliore compatibilità con l'idrogeno), e nei criteri di progetto delle stazioni di pompaggio. In particolare, sebbene abbia una densità energetica volumetrica minore di quella del gas naturale, l'idrogeno è meno viscoso, per cui, con un'adatta progettazione, l'energia necessaria per il suo pompaggio, diventa paragonabile a quella richiesta per la stessa quantità di energia trasportata con il gas naturale. Reti di distribuzione per l'idrogeno liquido, risultando particolarmente costose e di difficile gestione, sono state realizzate solo per applicazioni particolarmente specializzate, come il rifornimento di veicoli spaziali.

2.1.9 Utilizzo

Le due principali utilizzazioni previste in futuro per l'idrogeno, e per cui si sta lavorando attualmente nei laboratori di ricerca applicata, riguardano l'impiego come combustibile per la generazione di energia elettrica e per il trasporto. Impianti per la produzione centralizzata di energia elettrica e motori a combustione interna, alimentati ad idrogeno, sono già fattibili sulla base delle tecnologie esistenti, ed anche con emissioni sensibilmente ridotte rispetto a quelle degli impianti convenzionali. Deve tuttavia essere ulteriormente migliorato, il rendimento ed abbassati i costi; per questo sono in corso di sperimentazione, materiali e soluzioni innovative che dovrebbero arrivare a maturazione nel giro di alcuni anni.

Ma lo strumento principale, il cui sviluppo condizionerà pesantemente la reale affermazione dell'idrogeno come vettore energetico pulito, sarà senza dubbio la cella a combustibile.

2.2 La cella a combustibile o fuel cell

Una cella a combustibile, è un dispositivo elettrochimico che converte direttamente l'energia di un combustibile in elettricità e calore, senza passare attraverso cicli termici, e quindi senza risentire delle limitazioni imposte dalla termodinamica. In sostanza funziona in modo analogo ad una batteria, in quanto produce energia elettrica attraverso un processo elettrochimico; a differenza di quest'ultima, tuttavia, consuma sostanze provenienti dall'esterno, ed è quindi in grado di funzionare senza interruzioni, finché al sistema viene fornito combustibile ed ossidante.

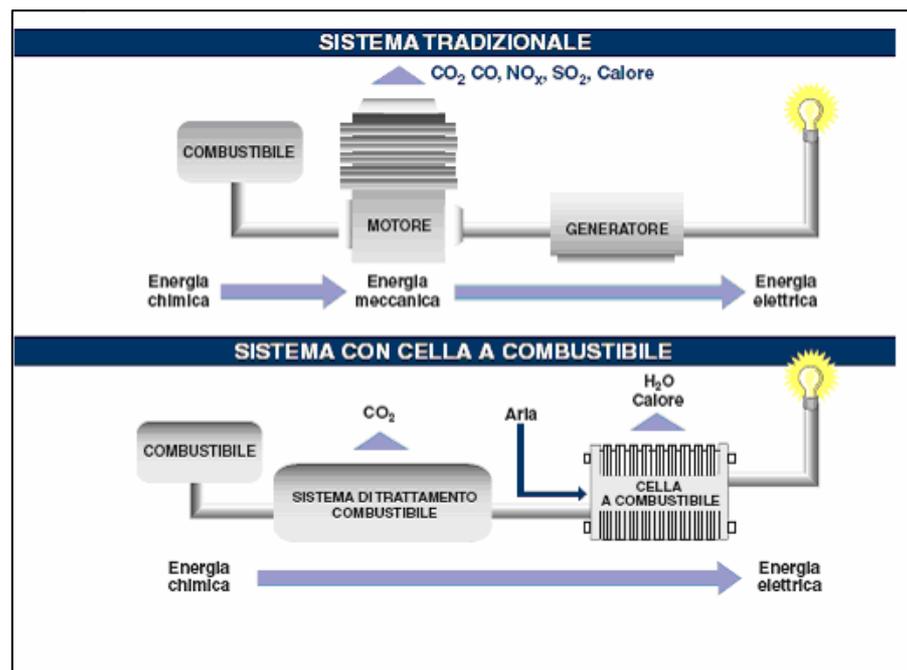


Figura 2.2: Confronto funzionamento batteria tradizionale-cella a combustibile

2.2.1 Come funziona una cella a combustibile

Una cella a combustibile è un dispositivo elettrochimico, che converte direttamente l'energia di combustibile, in elettricità e calore, senza passare attraverso cicli termici.

Una cella è composta da due elettrodi separati da un elettrolita.

Le reazioni che avvengono agli elettrodi, consumano fondamentalmente idrogeno ed ossigeno, e producono acqua, attivando un passaggio di corrente elettrica nel circuito esterno.

L'elettrolita, che ha la funzione di condurre gli ioni prodotti da una reazione e consumati dall'altra, chiude il circuito elettrico all'interno della cella.

La trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore.

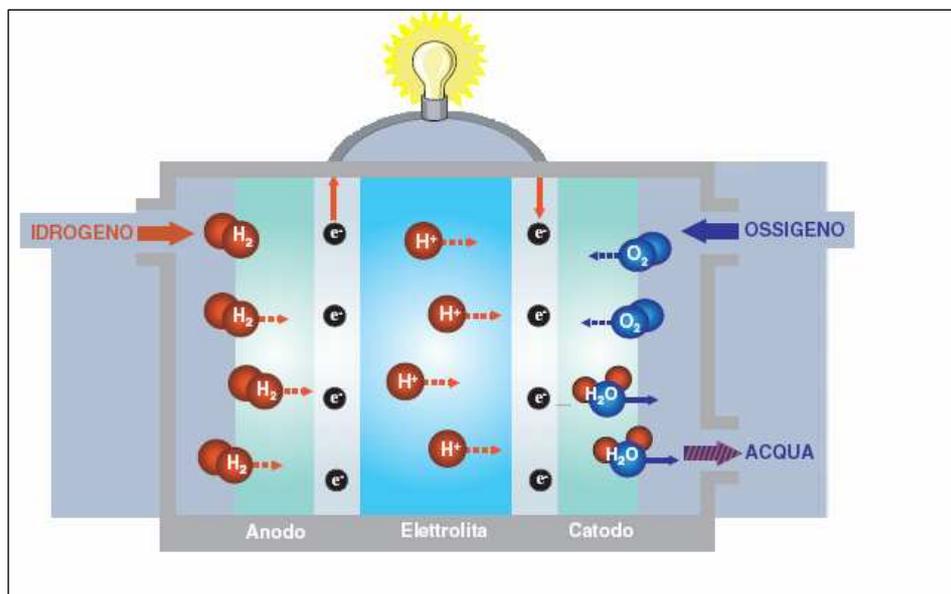


Figura 2.3: Funzionamento cella a combustibile

La cella è composta da due elettrodi in materiale poroso, separati da un elettrolita. Gli elettrodi fungono da siti catalitici per le reazioni di cella che consumano fondamentalmente idrogeno ed ossigeno, con produzione di acqua e passaggio di corrente elettrica, nel circuito esterno. L'elettrolita ha la funzione di condurre gli ioni prodotti da una reazione e consumati dall'altra, chiudendo il circuito elettrico all'interno della cella. La trasformazione elettrochimica, è accompagnata da produzione di calore, che è necessario estrarre, per mantenere costante la temperatura di funzionamento della cella.

Costruttivamente le celle sono disposte in serie, come si può vedere nella figura 2.4 seguente, a mezzo di piatti bipolari a formare il cosiddetto “*stack*”. Gli *stack* a loro volta sono assemblati in moduli per ottenere generatori della potenza richiesta. Si ottiene in questo modo, un dispositivo ad elevata efficienza di conversione energetica, di rendimento quasi indipendente dal carico e dalla taglia dell’impianto, flessibile nell’uso dei combustibili di partenza, di impatto ambientale assai ridotto, con emissioni trascurabili e bassa rumorosità.

Comunque, nonostante i notevoli progressi compiuti a livello mondiale per affinare la tecnologia e le caratteristiche delle celle, c’è da fare ancora molto lavoro per migliorare le prestazioni dei materiali; per incrementare le prestazioni energetiche ed ambientali, per aumentare l’affidabilità e la durata, per semplificare i sistemi e ridurre i costi, per creare una rete di distribuzione del combustibile, ed infine, per permettere la stesura di standard e normative.

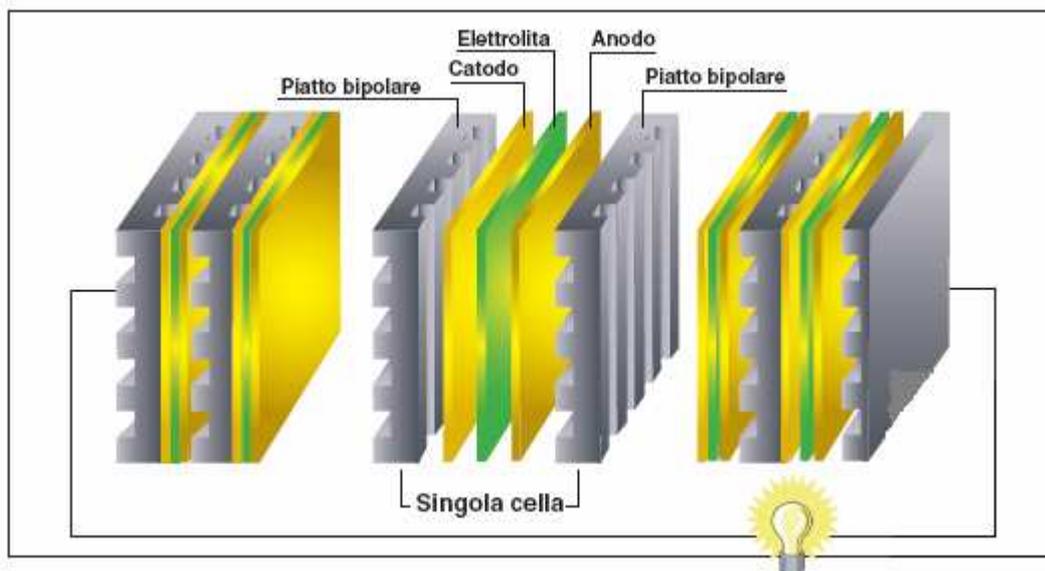


Figura 2.4: Composizione cella a combustibile

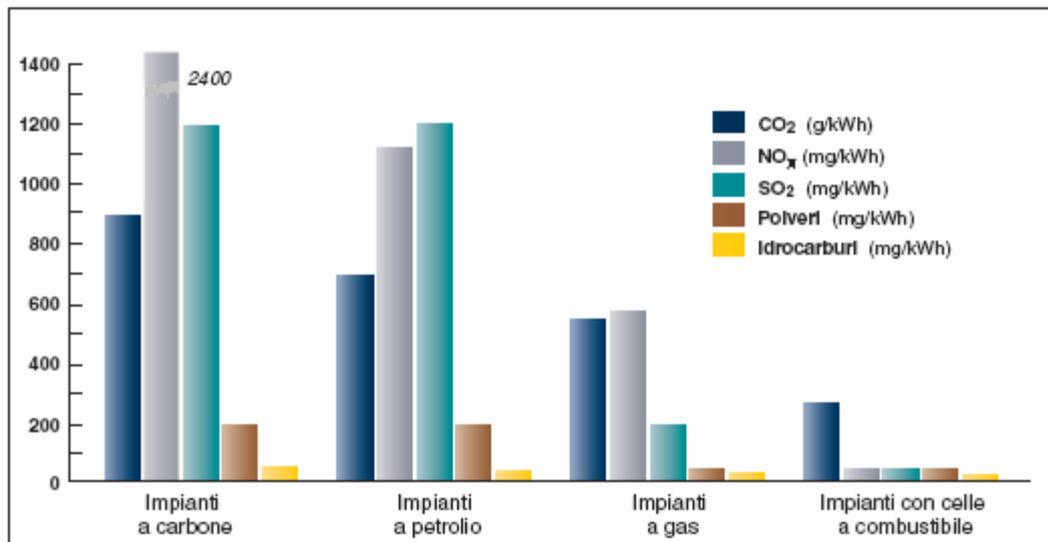


Figura 2.5: Impatto emissioni inquinanti

Tipi di celle e loro caratteristiche				
Tipi di celle	Temperatura	Elettrolita	Stato della tecnologia	Applicazioni
Celle alcaline	60-120 °C	Idrossido di potassio	Sistemi 5-80 kW	<ul style="list-style-type: none"> • Applicazioni spaziali • Generatori portatili • Trasporto
Celle ad elettrolita polimerico	70-100 °C	Membrana polimerica	Sistemi 1-250 kW	<ul style="list-style-type: none"> • Generazione portatile • Usi residenziali • Trasporto
Celle ad acido fosforico	160-220 °C	Acido fosforico	Impianti dimostrativi fino a 11 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Cogenerazione • Potenza distribuita
Celle a carbonati fusi	600-650 °C	Carbonato di litio e potassio	Impianti dimostrativi fino a 2 MW	<ul style="list-style-type: none"> • Cogenerazione industriale • Potenza distribuita
Celle ad ossidi solidi	800-1000 °C	Ossido di zirconio drogato	Stack 25 kW Impianto 220 kW	<ul style="list-style-type: none"> • Cogenerazione industriale • Potenza distribuita

Figura 2.6: Tipologie di celle a combustibili

2.2.2 Sicurezza

Essistono ancora molte perplessità per gli aspetti di sicurezza, a causa della poca familiarità con questo vettore, il che porta ad applicare condizioni particolarmente restrittive per la sua utilizzazione. Tuttavia, l'analisi della soggettiva "percezione di rischio", un'analisi attenta, ridimensiona il concetto di pericolosità dell'idrogeno.

Questo gas è meno infiammabile della benzina. Infatti, la sua temperatura di autoaccensione è di circa 550°C, contro i 230-500°C (a seconda della tipologia), della benzina.

L'idrogeno è il più leggero degli elementi (15 volte meno dell'aria), e perciò si diluisce molto rapidamente negli spazi aperti. E' praticamente impossibile farlo detonare, se non in spazi confinati. Per individuare concentrazioni potenzialmente pericolose (>4% in aria), si utilizzano sensori che possono facilmente comandare adeguati sistemi di sicurezza.

I veicoli della BMW, ad esempio, hanno vetri e tettuccio che in caso di presenza del gas, si aprono automaticamente.

Quando brucia, l'idrogeno si consuma molto rapidamente, sempre con fiamme dirette verso l'alto e caratterizzate da una radiazione termica a lunghezza d'onda molto bassa, quindi facilmente assorbibile dall'atmosfera. Per contro, materiali come la benzina, il GPL od il gas naturale, sono più pesanti dell'aria e, non disperdendosi, rimangono una fonte di pericolo per tempi molto più lunghi. E' stato calcolato, facendo uso di dati sperimentali, che l'incendio di un veicolo a benzina, si protrae per 20-30 minuti, mentre per un veicolo ad idrogeno, non dura più di 1-2 minuti.



Figura 2.7: Confronto incendio veicolo ad idrogeno e a benzina

La bassa radiazione termica, proprio delle fiamme da idrogeno, fa sì che esistano poche possibilità (al di là dell'esposizione diretta alla fiamma), che materiali vicini possano essere a loro volta incendiati, riducendo così, oltre alla durata dell'incendio, anche il pericolo di emissioni tossiche.

L'idrogeno, al contrario dei combustibili fossili, non è tossico né corrosivo, ed eventuali perdite nei serbatoi, non causano problemi di inquinamento del terreno o di falde idriche sotterranee.

2.2.3 Ricerca e sviluppo

2.2.3.1 Paesi esteri

I principali paesi industrializzati nel mondo, in particolare Stati Uniti, Giappone, Unione Europea, hanno tutti programmi di ricerca e sviluppo in corso, sia a breve che a medio termine, finalizzati a perfezionare la tecnologia delle celle a combustibile ed a introdurre lo sfruttamento dell'idrogeno, nella produzione di energia, nel giro di alcuni anni.

A livello europeo, nell'ottobre del 2002, è stato costituito un gruppo di esperti, composto da rappresentanti di grandi industrie del settore automobilistico ed energetico, dei servizi pubblici, di istituti di ricerca, con il compito di definire un programma e le priorità per promuovere la diffusione ed utilizzo dell'idrogeno.

Nel giugno 2003, a Bruxelles, è stato da questi presentato un documento sulla “Visione Europea” che, di pari passo con lo sviluppo delle celle a combustibile e delle tecnologie correlate, prevede che intorno al 2050, l’idrogeno prodotto da fonti rinnovabili, rivestirà un ruolo importante nella produzione di energia.

2.2.3.2 Italia

In Italia, da un punto di vista energetico, la disponibilità di un vettore flessibile e pulito, prodotto a partire da fonti diversificate, sia fossili che rinnovabili, è di estremo interesse per il nostro paese, vista la sua dipendenza dalle importazioni di gas e di petrolio, e l’estrema vulnerabilità del sistema elettrico, in caso di aumento dei consumi o di difficoltà di importazione dell’energia.

Analogo interesse, rivestono i risvolti ambientali connessi con tale scelta, che potranno favorire il conseguimento degli obiettivi previsti dal Protocollo di Kyoto⁽⁵⁾ e dare un contributo significativo alla riduzione dell’inquinamento locale.

In particolare, l’impiego dell’idrogeno nei trasporti, contribuirebbe a migliorare la qualità dell’aria nei centri urbani che, nonostante i grandi progressi realizzati ed attesi nei veicoli convenzionali e nei relativi sistemi di abbattimento, ancora presenta delle criticità (smog fotochimica, articolato, policromatici, ecc.).

Infine, per ultimo ma non meno importante, tutti questi benefici si combinano anche con gli interessi dell’industria nazionale: l’essere presenti nel mercato che si aprirà di qui a pochi anni, è indispensabile per aspirare ad una posizione competitiva in questo business.

D’altra parte, gli ingenti investimenti necessari, richiedono il coinvolgimento attivo e convinto dei principali attori nazionali interessati (governo, società energetiche, industrie, utenti, strutture di ricerca); inoltre, le numerose competenze necessarie ed i diversi interessi coinvolti, devono essere gestite in un quadro organico ed unitario, che persegua in maniera coordinata, obiettivi di interesse strategico per il paese, avvalendosi anche di collaborazioni internazionali.

⁽⁵⁾ Il Protocollo di Kyoto del 1998, prevede che tutti i paesi industrializzati, si impegnino a ridurre, per il periodo 2008-2012, il totale delle emissioni di gas ad effetto serra, almeno del 5%, rispetto ai livelli del 1990. L’Italia si è impegnata per il 6,5%.

Riassumendo, le attività previste in Italia per il breve-medio termine, riguarderanno:

- 1) la generazione di idrogeno pulito, a partire da combustibili fossili;
- 2) la valutazione e la fattibilità delle opzioni disponibili per il sconfinamento della CO₂;
- 3) la produzione da fonti rinnovabili, in particolare dall'energia solare;
- 4) la messa a punto di sistemi di trasporto e distribuzione, le creazione di una rete di infrastrutture e di stoccaggio;
- 5) la generazione di energia elettrica stazionaria, sia centralizzata in impianti di taglia industriale, sia distribuita in sistemi portatili e per utenze familiari;
- 6) lo sviluppo di autoveicolo funzionanti ad idrogeno;

2.3 I veicoli a idrogeno

Come già detto precedentemente, a livello globale, circa il 30% delle emissioni di CO₂ in atmosfera, è causato dai trasporti, del resto responsabili anche per altri tipi di inquinamento. Oltre ad agire sull'efficienza dei veicoli tradizionali e a cercare di utilizzare combustibili più puliti, per cercare di limitare l'effetto serra, appare opportuno sviluppare la tecnologia del veicolo elettrico e, fra le varie soluzioni, quella più promettente a medio-lungo termine, è basata sull'uso dell'idrogeno in veicoli equipaggiati con celle a combustibile.

2.3.1 Utilizzo delle celle a combustibile nella trazione

L'intervento in questo settore, è orientato allo sviluppo di motori a combustione interna, sia di motori con celle a combustibile, questi ultimi essenziali per un sistema di trasporto a minimo impatto ambientale. L'uso delle celle a combustibile per la trazione, presenta infatti numerosi vantaggi, ma comporta un grosso cambiamento rispetto alla filosofia attuale dei veicoli.

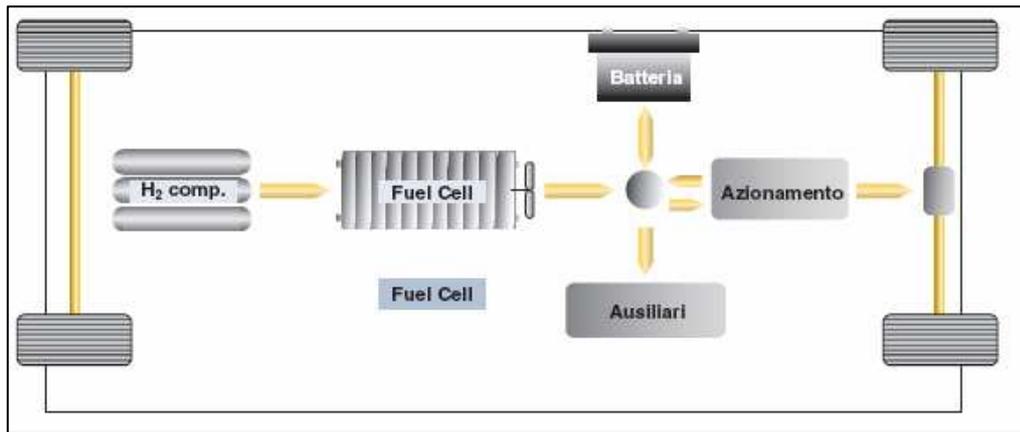


Figura 2.8: Esempio di struttura generale veicolo a celle a combustibile. Rispetto ad un veicolo tradizionale alimentato ad idrogeno, il consumo con una cella a combustibile, è meno della metà

I veicoli con motori a cella a combustibile, hanno tutte le caratteristiche di un veicolo elettrico, in quanto il sistema di generazione, produce corrente continua. Su questi si troveranno quindi, tutti i sistemi di regolazione e controllo della trazione, propri dei veicoli a batteria. Inoltre, la presenza di un motore elettrico e di un sistema di accumulo, consente il “recupero in frenata”, opzione che, soprattutto in cicli caratterizzati da molte accelerazioni e frenate, come quelli urbani, può portare a notevoli risparmi di combustibile. Le prestazioni, sono paragonabili a quelle dei veicoli tradizionali, e l’autonomia dipende ancora una volta, dalla tecnologia utilizzata per lo stoccaggio dell’idrogeno, ma la maggior efficienza delle celle a combustibile (circa il doppio dell’equivalente motore convenzionale su cicli urbani, in quanto le celle non sono penalizzate nel funzionamento a potenza ridotta), semplifica un poco questo problema.

La guidabilità è quella dei veicoli elettrici che, come detto, ben si presta soprattutto a cicli urbani caratterizzati da accelerazioni a bassa velocità.

L’impatto ambientale di un veicolo a celle, alimentato ad idrogeno, è praticamente nullo, con i gas di scarico che contengono solamente aria e vapor d’acqua. Le caratteristiche delle celle (modularità, rendimenti elevati anche per dimensioni medio-piccole e per carichi parziali), permettono inoltre, la realizzazione dei veicoli con taglie anche molto diverse (dalla bicicletta all’automobile, all’autobus, alle motrici ferroviarie), con la stessa tecnologia e con caratteristiche di prestazioni, consumi ed impatto ambientale, equivalenti. Nel campo della trazione, dopo i primi prototipi realizzati con tecnologie diverse, il tipo di cella su cui si sono concentrati tutti i costruttori di veicoli, è quello ad elettrolita polimerico, che meglio soddisfa i requisiti specifici dell’uso sui veicoli stradali.

Anche il grado di maturità tecnologica sta crescendo, avendo le maggiori case automobilistiche già realizzato i primi prototipi marcianti, sia di autovetture che di autobus, anche se resta ancora molta strada da fare, per iniziare una produzione di serie.

Il fattore chiave su cui occorre focalizzare l'attenzione, è rappresentato dalla riduzione dei costi. Il target per un sistema con celle a combustibile, fissato dai costruttori di veicoli, è dello stesso ordine di grandezza di quello degli odierni motori (50-100\$/kW), ma attualmente il costo di questi ultimi, è di gran lunga inferiore a quello degli attuali prototipi di sistemi con celle (5.000-10.000\$/kW).

Data la semplicità costruttiva di queste, è facile ipotizzare che in presenza di produzioni di massa, tali costi potranno essere drasticamente ridotti, almeno per quanto riguarda la manodopera e le lavorazioni meccaniche, ma attualmente il costo dei materiali (particolarmente catalizzatore, elettrodi e membrana), è ancora troppo alto per raggiungere gli obiettivi prefissati. Comunque, tutti i principali costruttori automobilistici, hanno in corso ricerche per tentare di abbattere i costi di questi componenti.

2.3.2 A quando il veicolo ad idrogeno?

Vi sono diversi impedimenti che si oppongono alla penetrazione del veicolo ad idrogeno e che richiedono uno sforzo notevole per la loro rimozione da parte di tutti i soggetti coinvolti (ed in particolare, da parte delle autorità pubbliche), per far sì che la tecnologia si affermi definitivamente su larga scala, nel giro di qualche decennio. Le principali barriere sono tecnologiche, strutturali, economiche, normative, di accettazione sociale.

Tra i problemi tecnologici, il sistema di accumulo dell'idrogeno a bordo, è uno dei più critici, in quanto condiziona pesantemente l'autonomia del veicolo, rispetto ai concorrenti convenzionali, a causa dell'eccessivo peso ed ingombro dei serbatoi attuali. Vanno pertanto intensificati gli sforzi in ricerca, sviluppo e dimostrazione sulle opzioni di stoccaggio praticabili, con l'obiettivo di aumentare la densità energetica, sia in volume che in peso. Inoltre, il costo di una cella ad elettrolita polimerico, in un sistema di produzione ottimizzato su scala industriale, risulterà molto influenzato dal contenuto di metalli preziosi nel catalizzatore. E' pertanto necessario operare una riduzione del contenuto di platino nei catalizzatori e, in prospettiva, l'utilizzo di nuovi materiali sostitutivi di costo inferiore.

Fra gli ostacoli strutturali, si può includere la mancanza di una rete di stazioni di rifornimento: l'avvio della realizzazione delle infrastrutture di distribuzione, è un'operazione complessa, da attuarsi con i produttori di autoveicoli, sia per l'incertezza

sulla redditività dell'investimento, in una mancanza di una domanda ben quantificabile, sia per quanto riguarda la scelta delle tecnologia di produzione dell'idrogeno, la fonte da usare, la modalità di approvvigionamento, la scelta dei siti. Dovranno essere previste almeno due fasi: una prima, sperimentale, durante la quale l'idrogeno potrà essere fornito da strutture ad hoc, predisposte presso i gestori delle flotte ed aperte all'utenza esterna; una seconda, accompagnata necessariamente da incentivi pubblici, per coprire le perdite iniziali, in cui la commercializzazione dovrà essere accompagnata, se non preceduta, dalla realizzazione di un numero adeguato di strutture di rifornimento, distribuite sul territorio, in modo da non pregiudicarne il successo.

I costi di un veicolo ad idrogeno, rappresentano in altro svantaggio con cui confrontarsi. Dopo la fase prototipale, in cui tali mezzi sono comunque fuori mercato, le valutazioni, dopo circa 15 anni dall'avvio della fase di commercializzazione e una volta che siano subentrate economie di scala, oscillano intorno al prezzo di 20.000US\$ per autovettura, superiore di circa 2.000US\$, rispetto alla stima del prezzo di un'autovettura convenzionale equivalente.

Si rendono poi necessari, interventi tempestivi mirati all'adeguamento della normativa, strutturata ora sulla tecnologia dei mezzi convenzionali si trasporto, così come sarebbero utili norme incentivanti, che privilegino la circolazione degli autoveicoli ad idrogeno nei centri urbani, in quanto a basso impatto ambientale, o che sopperiscano ad alcune difficoltà di ordine pratico, dovute per esempio, all'incertezza di poter disporre di un conveniente mercato dell'usato per il veicolo, alla difficoltà in alcuni casi, di assicurarlo e/o di avere premi assicurativi, confrontabili a quelli dei veicoli convenzionali,ecc..

Infine, a livello psicologico, i cittadini tendono mediamente a privilegiare l'uso delle tecnologie consolidate, perché più familiari, e quindi percepite più sicure e vantaggiose.

La penetrazione di una nuova tecnologia quindi, dovrà essere accompagnata da una campagna di informazione, tendente a ridurre la barriera di accettabilità sociale, attraverso una evidenziazione dei vantaggi connessi alla tecnologia e delle modalità per superare i possibili inconvenienti.

Dovrà rendersi noto pertanto, che sia la sicurezza che le prestazioni degli impianto e della tecnologia dell'idrogeno, non hanno niente da invidiare rispetto a quelle tradizionali; in particolare anzi, i vantaggi ambientali, si presentano indubbiamente superiori. L'utente quindi, dovrà sviluppare una sensibilità ecologica più spinta, e considerarsi sempre più protagonista nella realizzazione di una società compatibile con la salvaguardia

dell'ambiente. Solo in questo caso l'idrogeno, ci potrà dare realmente una mano a mantenere l'aria più pulita e migliorare la vivibilità del pianeta.

Capitolo 3

3.1 Sistema di accumulo al litio

In un veicolo elettrico (EV) l'accumulatore fornisce la corrente di alimentazione al motore elettrico principale in maniera esclusiva o in combinazione ad altri sistemi, come ad esempio un sistema a celle a combustibile. La tipologia di batterie presenti sul mercato è piuttosto vasta: vi sono infatti sistemi di accumulo al Piombo, a Idruri metallici, al Sodio-Nickel Cloro ed al Litio. Le batterie al Litio presentano alte densità volumiche e massiche di energia ma anche da un costo molto elevato. Sebbene nei prossimi anni sia ipotizzabile una maggiore diffusione, esistono già oggi in commercio o in fase di prototipo avanzato vetture elettriche che utilizzano accumulatori di questo tipo, tenendo presente che sono comunque già usate quotidianamente, nei cellulari e nei computer portatili.

3.1.1 Principio di funzionamento

Visto dai suoi morsetti esterni, un accumulatore elettrochimico è un doppio bipolo che scambia energia elettrica con un circuito esterno, che opera in corrente continua. Quando la corrente entra dal polo positivo, si ha un accumulo di energia all'interno dell'accumulatore, quando invece è uscente, si ha la restituzione di parte dell'energia accumulata.

Gli accumulatori sono basati su un dispositivo elementare detto *cella elettrochimica*: essa è costituita da due elettrodi separati da un elettrolita. Qualunque sia il tipo di cella, le tensioni sono dell'ordine del volt; diviene quindi necessario, per raggiungere tensioni dell'ordine delle decine o centinaia di volt, connettere in serie più celle.

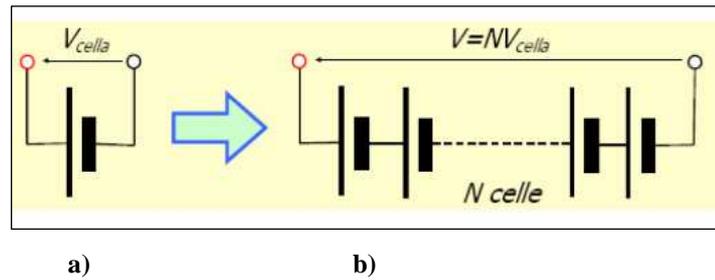


Figura 3.1: a) schema elementare del funzionamento di una cella elettrochimica (in rosso il polo positivo)
 b) Connessione di più celle in serie.

Il principio di funzionamento di una cella elettrochimica al Litio può essere illustrato con riferimento alla seguente figura:

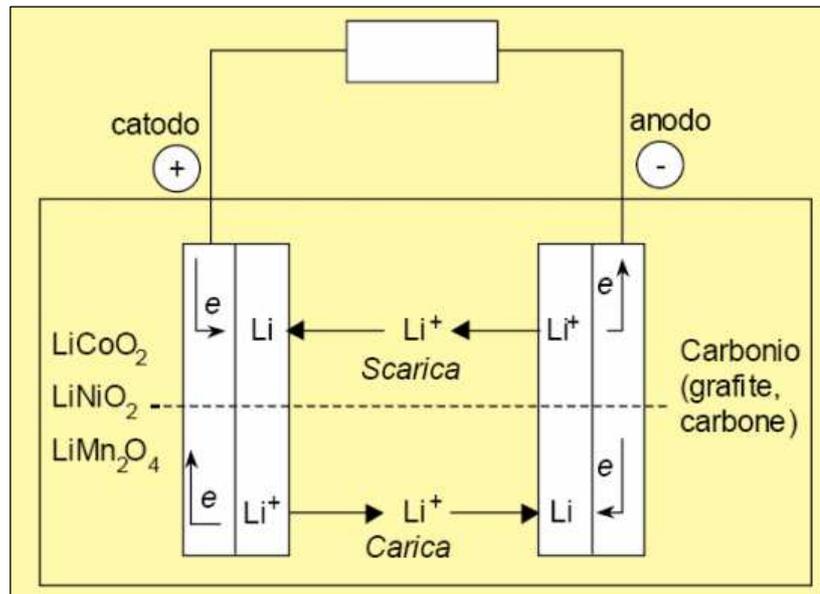


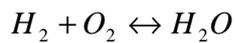
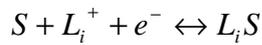
Figura 3.2: Principio di funzionamento di una cella elettrochimica al litio

Esso si basa sulla caratteristica riscontrata in alcune sostanze, di contenere atomi di Litio all'interno della struttura cristallina (*Litio interstiziale*). Il processo può essere descritto in maniera semplificata come segue: durante la scarica, viene erogato dal polo negativo al circuito esterno, un elettrone sottratto ad un atomo di Litio interstiziale. Il Litio che ha ceduto l'elettrone, trasformato in ione positivo, entra nell'elettrolita e migra verso il catodo dove, ricevuto un elettrone dal circuito esterno, assume una forma elettricamente neutra e diventa così, interstiziale (*processo di intercalazione*). L'opposto avviene durante la carica, e le reazioni sotto riportate procedono da destra verso sinistra (*processo di*

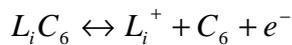
deintercalazione). Per questa caratteristica del Litio di muoversi dall'anodo al catodo e viceversa, questo accumulatore è talvolta indicato come *rocking-chair battery*.

L'elettrolita, utilizzato solo come mezzo per il transito degli ioni e non partecipando direttamente alle reazioni, presenta una densità che non varia durante i processi di carica e scarica, e può essere sia liquido (sali di Litio disciolti in ambiente organico) nella batterie dette *al Litio-ioni*, sia solido, in quelle dette *al Litio-polimeri*. Lo schema di riferimento si riferisce ad una cella ad elettrolita liquido: l'anodo è costituito da carbonio in forma di carbone o grafite, con infiltrazione nella matrice di Litio; per il catodo si possono invece usare ossidi metallici di varia natura: nella pratica i metalli più impiegati sono Cobalto, Nichel e Manganese (LiCoO_2 , LiNiO_2 , $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$).

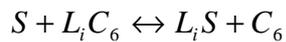
- Reazione polo positivo-Catodo



- Reazione polo negativo-Anodo



- Reazione complessiva



con S : LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMn_2O_4

Spesso accade che, un numero limitato di celle sia posto all'interno di un contenitore per realizzare un componente meccanicamente omogeneo detto modulo; la batteria vera e propria sarà poi costituita da più moduli in serie. Esiste anche la possibilità teorica di realizzare la connessione in parallelo di più elementi in serie, ma è raramente utilizzata per la difficoltà di ripartire uniformemente la corrente fra i vari rami, cosa che non succede con il collegamento in serie, che ha proprio la caratteristica che avere la stessa corrente in ogni ramo.

3.1.2. Aspetti costruttivi

Si possono classificare tre differenti tipi di cella al Litio in base alla modalità con cui sono assemblate:

1. **Button o Coin** = sono costituite da strati singoli di anodo e catodo, divisi da un separatore microporoso che ha la funzione di conservare le polarità degli elettrodi (non influenza cioè la conduttività ionica, ma permette al Litio di muoversi attraverso l'elettrolita e di diffondersi). Vengono posizionate all'interno di un contenitore sigillato di metallo, nel quale è immagazzinato l'elettrolita.
2. **A spirale avvolta** = hanno una forma cilindrica e sono formate da elettrodi di materiale attivo, rivestiti con pellicole o sottili griglie conduttive. Questi elementi sono poi avvolti assieme ad un separatore attorno ad un'anima metallica e gli elettrodi avvolti, detti *jelly-roll*, sono poi inseriti all'interno di un contenitore.
3. **Plastic-Litio-ioni (PLI)** = sono composte da elettrodi e separatori simili a quelli delle celle a spirale avvolta, ma ciò che cambia è il materiale legante addizionale impiegato nella pellicola dell'elettrodo. Esso deve infatti consentire la laminazione a caldo dei materiali attivi costituenti i diversi strati, che si trovano ad essere compattati senza la necessità di essere tenuti insieme da un involucro esterno. Il contenitore, che assume quindi, in questo caso la sola funzione protettiva, è solitamente un foglio di alluminio multistrato di forma rettangolare. In queste celle il liquido elettrolita è contenuto all'interno degli elettrodi porosi e del separatore, non è cioè presente elettrolita libero.

In tutti i tipi di celle descritti, sono presenti dei collettori di rame che trasferiscono gli elettroni generati dalla reazione al circuito esterno.

3.2 Parametri caratteristici

3.2.1 Forza elettromotrice, Capacità, Rendimento

Un parametro fondamentale per una cella elettrochimica, è la massima differenza di potenziale che si ha tra gli elettrodi, quella cioè che corrisponde ad una resistenza infinita del circuito (*circuito aperto*), e corrisponde quindi ad un passaggio di corrente nullo. Come

per le celle a combustibile, tale grandezza, nota anche come forza elettromotrice (*fem*), è ricavabile dall'equazione fondamentale dell'elettrochimica:

$$E_0 = \frac{\Delta G}{nF}$$

dove:

n = numero di elettroni scambiati durante la reazione

F = costante di Faraday [C/mol]; è la quantità di carica elettrica contenuta in una mole di elettroni, pari a 96485 C

E₀ = tensione a circuito aperto OCV [V]

ΔG = energia libera di Gibbs [J/mol]

La *fem* è anche funzione della temperatura, della concentrazione di reagenti e dei prodotti della reazione coinvolta nella conversione dell'energia; tale dipendenza è espressa dall'equazione di Nerst. Si ha infatti, per una generica reazione:



$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(a_C^c a_D^d)}{(a_A^a a_B^b)}$$

dove:

E₀ = tensione a circuito aperto OCV [V] alla pressione di riferimento, pari a 100 kPa

a_i = attività della sostanza i-esima, pari al rapporto tra la pressione della sostanza e una pressione di riferimento, pari a 100 kPa

R = costante dei gas, pari a 8.314 J/(K mol)

F = costante di Faraday, è la quantità di carica elettrica contenuta in una mole di elettroni, pari a 96485 C [C/mol]

T = temperatura [°K]

n = numero di elettroni scambiati durante la reazione

La forza elettromotrice di una cella al Litio, alla temperatura di 25°C, è circa pari a 4.2 V DC.

Un accumulatore viene spesso studiato anche in riferimento alla carica elettrica in ingresso o in uscita. Se si prende come verso positivo della corrente ai morsetti, quello della corrente uscente, si può definire la carica estratta Q_e e l'energia scambiata E_e con il circuito elettrico in un certo intervallo di tempo T :

$$Q = \int_{\tau} i(t) dt$$

$$E = \int_{\tau} i(t)v(t) dt$$

Se si considera adesso, un processo di scarica della batteria, la capacità C è la carica elettrica complessiva che essa è in grado di liberare sotto condizioni specifiche. Normalmente è determinata sotto scarica a corrente costante I_b , fino ad un valore minimo di tensione V_{fs} . L'energia erogata nelle medesime condizioni è data invece, dal prodotto della capacità C per la tensione media di erogazione V_m .

Si può osservare sperimentalmente, che la quantità di carica erogata, dipende sia dal valore della corrente di scarica che dalla temperatura; in particolare, più è alta la corrente di scarica, minore è la quantità di carica che si riesce ad erogare. Per quel che riguarda la temperatura, le batterie al litio presentano una dipendenza inferiore rispetto alle altre tipologie di accumulatori esistenti.

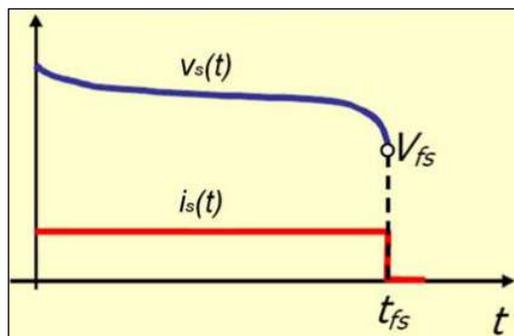


Figura 3.3: Processo di scarica a corrente costante

$$C = \int_0^t i_s(t) dt = I_b t_{fs}$$

$$E_e = \int_0^{t_{fs}} v_s(t) i_s(t) dt = I_b t_{fs} \frac{\int_0^{t_{fs}} v_s(t) dt}{t_{fs}} = CV_m$$

dove:

C = capacità di batteria [Ah]

E_e = Energia erogata [J]

i_s = corrente di scarica [A]; si considera un processo di scarica a corrente costante, di valore I_b

v_s = tensione di scarica [V]

t_{fs} = tempo di fine scarica [s]

V_m = tensione media di erogazione [V]

V_{fs} = tensione di fine scarica [V]

Al fine di valutare il livello di carica di una batteria, si impiega un parametro relativo alla profondità di scarica, chiamato **DOD (Depth of Discharge)**: esso è definito dal rapporto tra la carica estratta ad una corrente i_s e la capacità relativa alla stessa corrente. Più comunemente impiegato è il **SOC (State of Charge)**, che è dato dal rapporto tra la carica residua estraibile ad una corrente i_s e la capacità, sempre relativa, alla stessa corrente:

$$DOD = \frac{Q_e(i_s)}{C(i_s)}$$

$$SOC = \frac{Q_r(i_s)}{C(i_s)} = \frac{(C(i_s) - Q_e(i_s))}{C(i_s)} = 1 - DOD$$

Se si considera un procedimento di carica e scarica, si può osservare che la quantità di carica elettrica che si riesce ad estrarre da una batteria durante la scarica, è solo una frazione di quella introdotta durante il processo di carica; si può pertanto introdurre il rendimento di carica η_Q : si definisce come il rapporto tra la carica introdotta nell'intervallo $0 - t_{fc}$ e quella estratta nell'intervallo $t_{is} - t_{fs}$. Passando dalle cariche elettriche alle energie, si può poi definire analogamente, un rendimento energetico η_E . Poiché la tensione durante

la carica si mantiene mediamente superiore a quella durante la scarica, nel caso di una scarica a corrente costante come quella in figura sotto si ha $\eta_E < \eta_Q$:

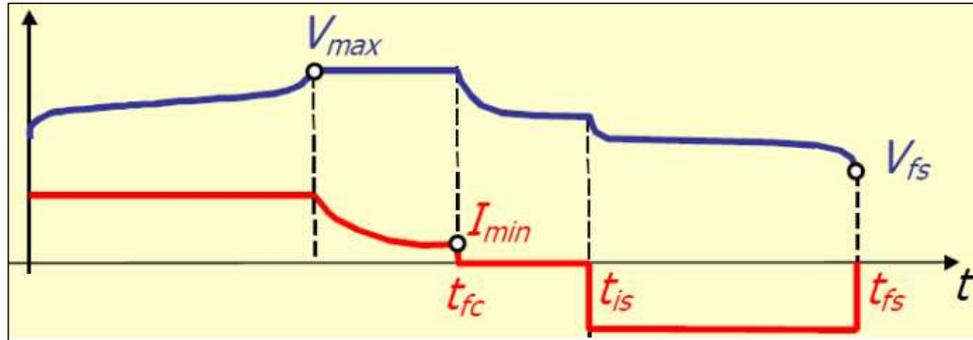


Figura 3.4: Profili di tensione (in blu) e corrente (in rosso) durante una procedura di carica e scarica

$$\eta_Q = \frac{Q_s}{Q_c} = \frac{\int_{t_{is}}^{t_{fs}} |i_s(t)| dt}{\int_0^{t_{fc}} |i_c(t)| dt}$$

$$\eta_E = \frac{E_s}{E_c} = \frac{\int_{t_{is}}^{t_{fs}} |v_s(t) i_s(t)| dt}{\int_0^{t_{fc}} |v_c(t) i_c(t)| dt}$$

dove:

Q_s = carica erogata [C]

Q_c = carica immessa [C]

i_s = corrente di scarica [A]

t_{is} = tempo di inizio scarica [s]

t_{fs} = tempo di fine scarica [s]

i_c = corrente di carica [A]

t_{fc} = tempo di fine carica [s]

E_s = energia erogata [J]

E_c = carica immessa [J]

v_s = tensione di scarica [V]

v_c = tensione di carica [V]

Si è visto un processo nel quale vi è una fase di carica a corrente costante seguito da una fase a tensione costante: tale procedura, detta I-U, rappresenta un buon compromesso tra efficienza e tempo di ricarica.

3.2.2 Valori tipici

Le batterie sono componenti inserite in sistemi elettrici complessi; è quindi importante conoscere alcuni parametri tipici che permettano di valutare le caratteristiche e le prestazioni degli accumulatori, al fine di poter eseguire un corretto dimensionamento. I dati nominali prendono come riferimento una scarica della batteria in condizioni controllate, con valori costanti di corrente e temperatura ambiente. Quando l'accumulatore, a temperatura nominale θ_n e completamente carico, è scaricato con una corrente costante pari alla corrente nominale I_n , esso eroga una quantità di carica pari alla sua capacità nominale C_n . Altri parametri importanti sono la tensione di fine scarica nominale V_{fsn} ed il tempo di scarica nominale t_n , il cui valore più diffuso è 10 ore ($C_n = C_{10}$). Poiché la capacità, la corrente ed il tempo di scarica, sono legate dalla relazione descritta nel paragrafo precedente, è sufficiente specificare due di queste grandezze, per ottenere la terza (la prassi è quella di specificare C_n e t_n).

Per quanto riguarda la tensione nominale di una batteria, essa viene assunta pari alla tensione nominale di cella (definita dall'elettrochimica) e moltiplicata per il numero di celle poste in serie. La tensione nominale per una cella al litio è di circa 3,6 V DC.

Altri dati di targa caratteristici delle batterie sono: l'energia specifica E_s [Wh/kg] e la densità di energia E_v [Wh/dm³]. Si possono anche riportare valori di potenza specifica P_s [W/kg] e densità di potenza P_v [W/dm³].

Nella tabella1, sono riportati i principali dati caratteristici per alcune batterie al litio in produzione. Si noti che vi è anche una indicazione relativa alla vita utile ed all'*autoscarica*. Il primo aspetto è legato a fenomeni di invecchiamento che possono essere causati dalla progressione di fenomeni chimici indipendenti dalle reazioni che avvengono all'interno dell'accumulatore (*shelf life*) o dal numero di cicli di carica e scarica effettuati (*cycle life*); solitamente si considera terminata la vita utile di una batteria quando la capacità si riduce all'80% del valore nominale. L'*autoscarica* è invece un fenomeno che riguarda le batterie inattive, soggette ad una progressiva riduzione della carica erogabile. Il costo delle batterie al litio si aggira attorno ai 500 €/kWh, anche se stanno avendo un forte sviluppo, grazie al quale, il costo sarà destinato a scendere velocemente.

	<i>Saft VLE</i>	<i>Saft VL7P</i>	<i>Saft VL20P</i>	<i>GBP GMP</i>
<i>Tensione nominale [V]</i>	3,6	3,6	3,6	3,6
<i>Capacità nominale [Ah]</i>	/	/	/	/
<i>Energia massica [Wh/kg]</i>	110	67	89	110
<i>Energia volumica [Wh/l]</i>	158	131	187	202
<i>Potenza massica [W/kg]</i>	533 ⁽¹⁾	1811 ⁽²⁾	1413 ⁽²⁾	470 ⁽¹⁾
<i>Potenza volumica [W/l]</i>	753 ⁽¹⁾	3526 ⁽²⁾	1974 ⁽²⁾	851 ⁽¹⁾
<i>Vita utile [cicli]</i>	/	/	/	> 500 ⁽³⁾
<i>Temperatura [°C]</i>	/	/	/	-20÷60
<i>Autoscarica [%]</i>	/	/	/	<7

Tabella 3.1: Valori tipici per batterie al litio in produzione

⁽¹⁾* Scariche di 30 s con SOC=50%

⁽²⁾** Scariche di 10 s con DOD=50%

⁽³⁾*** Scariche all'80% (cycle life)

3.3 Controllo e Gestione

Le batterie al Litio, presentando alte densità volumiche e massiche di energia, necessitano di una progettazione particolarmente accurata. E' infatti opportuno che non siano sovraccaricate oltre un certo limite, al fine di non avere emissioni di gas roventi o esplosioni. La temperatura deve essere tenuta sotto controllo, così come la tensione e la corrente delle celle in serie durante il processo di carica. Si devono tra l'altro evitare cariche e scariche troppo profonde e impiegare metodi di equalizzazione della carica per evitare squilibri tra le celle. Per questi motivi di sicurezza, questo tipo di batteria ha subito dei ritardi nello sviluppo tecnologico, aspetti che comunque sono stati del tutto risolti, negli ultimi tempi, favorendone così la diffusione.

3.3.1 Monitoraggio di tensione e corrente

Le batterie al Litio devono essere sottoposte ad un accurato monitoraggio, affinché ogni singola cella non superi i massimi valori di tensione e corrente ammessi (e di conseguenza, di temperatura). Considerando i problemi legati alla sovratensione, si deve tener presente che il solvente delle batterie al litio (ioni tipicamente di carbonato organico), è

infiammabile e soggetto a fenomeni di decomposizione elettrochimica, ed infatti la sua instabilità verso l'ossidazione, facilita la formazione di CO e CO₂. Maggiore è la tensione, maggiore è l'entità della decomposizione. Per via della decomposizione dell'elettrolita, si ha tra l'altro un aumento della pressione interna al contenitore, che può provocare pericolosi innalzamenti di temperatura, sino al raggiungimento del valore critico di accensione dei vapori di CO e CO₂. In aggiunta alla formazione dei gas, la decomposizione dell'elettrolita genera anche dei sottoprodotti polimerici che si depositano sul materiale attivo del catodo, inquinando la sua superficie ed inibendolo, riducendo così prestazioni e vita della cella. Anche l'anodo, durante l'impiego della batteria, si trasforma: il solvente viene infatti ridotto sulle particelle di grafite, e forma uno strato di sali organici di litio insolubili e carbonato di litio, chiamato *Solid Electrolyte Interface (SEI)*. Una volta formato, il *SEI*, protegge la superficie dell'anodo da ulteriori riduzioni del solvente, mentre consente agli ioni litio di passare attraverso di esso: la sua continua crescita riduce così l'utilizzo di materiale attivo.

Anche se la differenza di potenziale del pacco batteria rimanesse entro limiti accettabili, alcune celle potrebbero danneggiarsi a causa dello sbilanciamento di tensione, e tale fenomeno potrebbe essere dovuto a variazioni di impedenza interna, alterazioni dello stato di carica ed al gradiente termico presente all'interno del pacco batteria (l'aumento di temperatura diminuisce infatti la resistenza interna ed aumenta l'*autoscarica*). Il bilanciamento delle celle è necessario per i veloci transitori presenti in alcune applicazioni, come ad esempio la frenatura a recupero effettuata nei veicoli: in questa circostanza infatti, la corrente immessa nella batteria può infatti provocare imprevisti incrementi di tensione.

Per quanto concerne la corrente di carica, un suo valore eccessivo, può causare il danneggiamento delle celle: in queste condizioni il litio non si diffonde correttamente nelle particelle dell'anodo di grafite, ma si deposita sotto forma di placche di litio metallico. Si formano così dei dendriti che possono forare il separatore tra gli elettrodi e formare dei cortocircuiti verso il catodo, impedendo la piena carica della cella e alimentando fenomeni di decomposizione elettrochimica e di ampliamento del *SEI*. L'eccessiva corrente di scarica può invece, danneggiare le celle in modo non permanente, rendendo necessaria una successiva polarizzazione per ristabilire la capacità degli ioni di litio, di muoversi nell'elettrolita.

Anche lo stato di carica deve essere opportunamente monitorato attraverso un meccanismo di equalizzazione delle celle: uno squilibrio di carica non permette infatti di sfruttare le

massime prestazioni della batteria. In particolare, durante la carica, le prestazioni del pacco batteria sono limitate dalla cella più carica, mentre in fase di scarica è la cella meno carica a raggiungere per prima il valore limite inferiore di tensione ammesso.

Il livello di carica di una batteria, è solitamente mantenuto in un intervallo compreso tra il 30% e 80% della capacità nominale; in questo modo si ha sempre la possibilità di erogare e recuperare significative quantità di energia. Il monitoraggio di tensione e stato di carica di ogni singola cella e della corrente del pacco batteria, viene effettuato attraverso un apposito controllore (*LEC*).

3.3.2 Sicurezza

Fino ad ora si è parlato della gestione delle batterie in condizioni di normale funzionamento, non considerando l'intervento di fattori esterni che invece a volte, possono intervenire e rendere le batterie al litio pericolose, sia per l'integrità dei componenti che per l'incolumità delle persone. Gli eventi potenzialmente più pericolosi che vengono opportunamente riprodotti in laboratorio per stimare il livello di sicurezza di questi dispositivi, sono:

1. la penetrazione di un corpo estraneo nella batteria
2. la messa in corto circuito dei poli
3. fenomeni di riscaldamento e di sovraccarico, ad esempio per via del mal funzionamento del caricabatteria.

Le batterie sono comunque dotate di opportuni sistemi di sicurezza:

1. valvole di sfiato per far fuoriuscire l'elettrolita (aspetto che consente di ridurre la pressione interna dell'accumulatore, evitandone lo scoppio).
2. fusibili di corrente e di temperatura, che tagliano la corrente di carica per evitare le conseguenze relative a fenomeni di corto circuito.
3. separatori microporosi, in grado di aumentare la resistenza interna della batteria alle alte temperature; risultano utili per ridurre i rischi in caso di eccesso di carica o di riscaldamento dell'accumulatore.

3.4 Ultimi sviluppi

3.4.1 Pericolo d'incendio

Effettivamente è capitato che lap top, cellulari e altri piccoli gadget elettronici si siano incendiati o addirittura le batterie siano improvvisamente scoppiate ma questo è avvenuto per: a) difetto di produzione delle batterie, b) quando le batterie al litio adottavano la desueta tecnologia del litio/cobalto oramai inutilizzata nella produzione di veicoli elettrici. Quasi tutti i veicoli elettrici non hanno più a bordo le batterie al litio cobalto (LiCo) ma le più moderne batterie ai polimeri di litio (LiPo) o le nuovissime batterie al litio ferro fosfato (LiFePO₄). Le batterie (Battery Packs) sono realizzate accoppiando celle base con tensioni da 3,7 volt per le LiPo o 3,2V per le LiFePO₄ dimensioni per raggiungere la tensione desiderata che sarà sempre un multiplo delle celle base. Teoricamente non esiste un limite al voltaggio tant'è che ultimamente si sono realizzate per il mercato nazionale, batterie al litio da 280 V per bus e furgoni da 35 quintali di portata e pacchi batteria ad uso stazionario da circa 600V. Il pacco batteria così costituito, ha integrato un sistema elettronico di controllo che ottimizza sia la scarica che la ricarica dell'intero pacco batteria tenendo d'occhio vari parametri per ciascuna delle singole celle che lo costituiscono quali la tensione, la corrente, la temperatura. Questo controllo prende il nome di BMS (Battery Management System), più è sofisticato e preciso più allunga la vita delle batterie. Il sistema batterie/BMS e tutto ciò che sta ad ulteriore integrazione non è una cosa del futuro, esiste, è commercializzato in quantità sufficienti da ritenerlo pronto alla fase di produzione industriale, suscettibile sì di miglioramento ma pur sempre capace di svolgere perfettamente la propria funzione che è quella di rendere fruibile l'accumulo di energia e la cessione della stessa al momento opportuno e nel miglior modo possibile. Il sistema permette anche di riportare nelle batterie l'energia prodotta dal motore elettrico (diventa generatore) nelle fasi di frenata o decelerazione consentendo in tal modo di disporre di un surplus di energia e quindi un ulteriore beneficio tra consumo/non spreco equivalente ad almeno un buon 10 %.

3.4.2 Sicurezza dei veicoli con batterie al litio-crash test

Queste nuove batterie al litio superano i test del 'chiodo' (nail test) ovvero la perforazione delle celle da parte un corpo metallico esterno che danneggia e laceri l'involucro e il

contenuto. Nessun problema se non quello che viene ad interrompersi il funzionamento della cella o, in alcuni casi, dell'intero pacco batteria ma si pensa che dopo un crash test reale (incidente, scontro) questo possa considerarsi l'ultimo dei problemi di cui preoccuparsi.

3.4.3 Costi

In 10 anni cioè da quando si parla di batterie al litio per il campo automotive, il prezzo è sceso di 20 volte, e in due anni si è dimezzato. Quando vi sarà una vera produzione di auto elettriche con batterie al litio, i prezzi scenderanno progressivamente. Un altro dato interessante da tenere presente trattando l'argomento dei costi energetici impiegati nella realizzazione delle batterie al litio, è che la materia prima che costituisce le batterie non viene (ovviamente) bruciata come accade invece con il carburante delle auto col motore a scoppio (che scompare quindi in una nuvola di CO₂ e gas incombusti, cicli aromatici e altre sostanze volatili tanto dannose alla salute umana quanto alla vita del pianeta intero), ma semplicemente il metallo viene rigenerato e riadattato per costruire nuove batterie efficienti quanto quelle da cui sono derivate. Ciò significa che il costo di riattivazione del sistema di accumulo sarà inferiore rispetto al costo del primo sistema da cui è derivato. Inoltre l'elettronica ha una vita estremamente lunga ed il motore elettrico ha una vita ancora più lunga, tanto da poter essere tolto e rimontato su generazioni e generazioni di veicoli elettrici .

3.4.4 Autonomia

Attualmente si possono di costruire set di batterie con autonomie intorno ai 200/300 chilometri, più che sufficienti alle necessità quotidiane del 90 % dei guidatori europei, rappresentando addirittura il doppio e il triplo delle percorrenze massime . Anche per i corrieri, che svolgendo la loro attività nel trasportare merci in città percorrono circa 250 km a settimana ovvero una media di 50 km al giorno, non avrebbe senso mettere a bordo pacchi batterie con range superiore ai 100 km. Oltre agli evidenti benefici provenienti dall'utilizzo dei veicoli elettrici, specialmente nell'ambito urbano, dal punto di vista ambientale in ragione delle mancate emissioni inquinanti e sonore, (rumore pressoché nullo), si aggiungono i vantaggi della razionalizzazione dei consumi elettrici, in quanto la ricarica delle batterie potrebbe essere effettuata durante la notte quando la richiesta nazionale è molto bassa. Oramai tutti (o quasi) i grandi costruttori di veicoli endotermici,

hanno scoperto che la strada che permetterà loro di continuare ad avere una speranza di sopravvivenza nel mercato è quella di realizzare veicoli elettrici. I grandi costruttori giapponesi, americani e alcuni europei hanno stretto collaborazioni attive con i più importanti produttori di batterie. Governi nazionali asiatici, americani ed europei spingono la ricerca grazie ad ingenti stanziamenti statali per la realizzazione di pacchi batterie integrati con l'elettronica e lo sviluppo di nuove batterie ancora più performanti delle batterie attuali al litio (LiPo e LiFePO4) con programmi a lunga scadenza.



Figura 3.5: Flotta di veicoli elettrici trasporto merci per il centro storico di Firenze: Master Renault, Gem-Chrysler e Corriere Bartolini

Capitolo 4

4.1 Modello matematico dell'Apparato propulsivo

Il modello utilizzato in questo lavoro, è stato sviluppato dal Dipartimento di Sistemi Elettrici e di Automazione (DSEA) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, partendo da un modello per uno scooter Piaggio, e quindi adattato successivamente per le quattro ruote, in particolare, al veicolo Porter - Piaggio®. Il modello matematico, è costruito in ambito matlab-simulink, che con determinati dati di input, è in grado di calcolare e descrivere il comportamento dei sottosistemi presenti a bordo del veicolo.

4.1.1 Struttura

La struttura del modello, è costituita da diversi sottosistemi, di cui si riportano di seguito, solo uno schema introduttivo, per eseguire successivamente, una loro descrizione più approfondita.

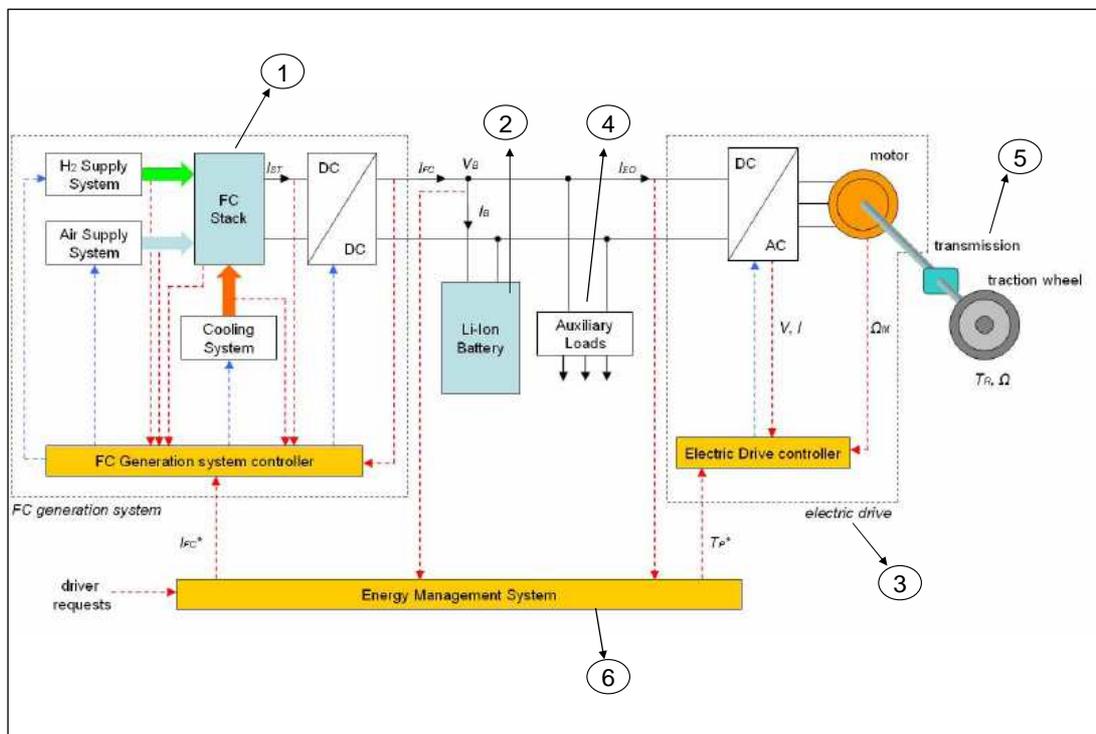


Figura 4.1: Schema generale veicolo ibrido HEV

1 - FC Generation System-Sistema di generazione FC

Costituisce la sorgente principale dell'energia richiesta dal veicolo, che viene fornita grazie all'utilizzo di un combustibile, nel presente caso costituito da idrogeno.

Chiamato per questo motivo *Primary Converter* o *convertitore di energia primaria*, è costituito dallo *stack* di celle ad idrogeno e da tutti i suoi ausiliari: sistema di alimentazione, sistema di raffreddamento, convertitore a valle dello *stack* per la regolazione della corrente prodotta.

L'insieme di tutti questi dispositivi, è gestito da un apposito controllore.

2 - Litio battery system-Sistema di accumulo al litio

Costituisce la seconda sorgente di energia propulsiva, che è in grado di erogare una determinata corrente, in base al livello di ricarica della stessa. Essendo inoltre anche un accumulatore, in grado cioè di immagazzinare energia per un utilizzo successivo, ha anche la funzione di recuperare energia durante la frenatura elettrica: ricaricandosi infatti, riesce a recuperare una certa quantità di energia, legata al suo livello di ricarica, ed ad utilizzarla così in seguito, invece di dissiparla sottoforma di calore.

In ogni caso, l'energia prodotta o rilasciata dopo una ricarica, è sempre inferiore rispetto a quella dello *stack*.

3 - Electric Drive- Azionamento

Tutti i dispositivi che si trovano a valle del *Primary Converter* e del *litio system battery*, viene chiamato *Electric Drive* o *azionamento*. Ne fanno parte il motore elettrico, dedicato alla movimentazione della trasmissione del veicolo, con i relativi chopper ed inverter per la regolazione della corrente, da continua ad alternata. Questo perché il motore presente a bordo, essendo di tipo *brushless*, ha bisogno di una corrente in input di tipo alternato, mentre la corrente in arrivo dal sistema di propulsione globale, è di tipo continuo: il gruppo dei convertitori dunque, oltre ad operare un cambiamento nella tipologia di corrente (eseguita dal chopper), adatta il suo valore da quello in uscita dal lato del propulsore, a quello adatto per il motore elettrico. Si ha quindi inizialmente una conversione DC/DC del chopper ed una DC/AC dell'inverter, tutto gestito da una tecnica di controllo sinusoidale PWM, effettuata da un controllore, chiamato *Electric Drive Controller*.

4 - Auxiliary loads - ausiliari

Come in tutte le tipologie di veicoli, a bordo sono presenti innumerevoli carichi, che costituiscono gli ausiliari, quali luci di posizione, indicatori di posizione, luci di stop, ecc..

Si tratta di carichi che vengono alimentati in tensione continua, per questo hanno bisogno di un chopper dedicato di tipo abbassatore, che nel caso in questione, si trova in parallelo al sistema di accumulo. Tale convertitore ha il compito di alimentare anche gli ausiliari di *stack*, che sono presenti all'interno del *FC Generation System*, per ovvi motivi di layout.

5 - Veicolo

Nel modello, viene rappresentato dall'insieme del sistema di trasmissione meccanico, dell'impianto frenante e da un modello dinamico.

6 - Energy Management System - EMS

Apparato dedicato al controllo della *fuel cell*, del sistema di accumulo e di tutti gli input che vengono immessi dal guidatore, come accelerazione e frenatura. In base a dei segnali di riferimento, gestisce i vari sottosistemi con una logica ben precisa.

4.1.2 Principio di funzionamento del modello

Il numero dei sottosistemi necessari al veicolo, sono multipli e di differente natura: per questo si ha bisogno di conoscere quali siano gli input necessari per avere determinati output di valido interesse, e come avviene la gestione di tutti i parametri in discussione.

Il modello, essendo stato elaborato in ambiente matlab - simulink, ha al proprio interno, una serie di equazioni e blocchi, che riescono a descrivere fedelmente il veicolo reale. Matlab ha così bisogno di una serie di input matematici, quali vettori e matrici, che restituiscono andamenti grafici e valori numerici delle grandezze di interesse. Nel caso qui trattato, gli input saranno percorsi stradali, che vengono nella pratica presi come riferimento, per la validazione dei veicoli a due e quattro ruote, come il cosiddetto ECE15-EUDC extraurbano.

Input del modello

Viene dato in ingresso al modello, un'equazione rappresentante le caratteristiche del percorso di riferimento che il veicolo deve seguire. Tale profilo è realizzato da un'equazione del tipo $\mathbf{v}=\mathbf{v}(\mathbf{t})$ per la velocità, $\mathbf{y}=\mathbf{y}(\mathbf{x})$ per l'altimetria e $\mathbf{T}=\mathbf{T}(\mathbf{x})$, per la

temperatura. Per il funzionamento del modello però, sono necessari anche altri tipologie di dati riguardanti i vari sottosistemi, quali quelli del motore elettrico utilizzato, del sistema di accumulo, dei vari convertitori e chiaramente del sistema propulsivo principale.

L'elenco dettagliato di tali parametri, è riportato in Appendice.

Elaborazione

All'interno del programma, è presente il cosiddetto *Driver Model* o *modello di pilota*, grazie al quale il modello riesce a stabilire le modalità di funzionamento, istante per istante. Il modello di pilota confronta la velocità effettiva del veicolo con quella richiesta dal profilo di velocità inserito, e calcolandone la differenza istante per istante, influisce sulla parzializzazione dell'acceleratore e dell'impianto frenante, cercando di ridurre a zero, l'errore commesso nel calcolo della differenza.

La sua funzione è perciò assimilabile a quella del pilota umano.

Ricordando che con *EMS* s'intende il controllo e la gestione di tutti i segnali da elaborare, questo calcola un valore di coppia di riferimento TP^* per l'azionamento, relativo all'intervento che il pilota dovrebbe eseguire sui comandi di acceleratore e freno: sarebbe perciò la coppia da applicare all'asse dell'albero del motore elettrico, per far seguire al veicolo il percorso impostato. Durante la trazione, tale coppia è positiva, durante la frenatura, negativa. La frenatura elettrica, che consente il recupero di parte dell'energia cinetica che andrebbe altrimenti persa sottoforma di calore, potrebbe in alcuni casi non essere sufficiente a garantire l'arresto del veicolo; in questi casi si prevede comunque l'utilizzo di un impianto frenante di tipo meccanico.

La TP^* calcolata dal sistema *EMS* ed elaborata dall'*Electric Drive Controller* (che gestisce a sua volta l'azionamento), insieme a tutti i parametri che regolano il motore elettrico e relativi convertitori, servono per calcolare la corrente continua I_{ED} di alimentazione dell'*Electric Drive*. Tale corrente sarà il risultato di quella fornita dal sistema primario di propulsione e del sistema di accumulo, secondo una logica di gestione energetica ben precisa dell'*EMS*.

La logica di gestione può essere affrontata in diversi modi, ritenendo alcuni aspetti più importanti di altri ed a seconda della tipologia di veicolo e del suo utilizzo; in questo lavoro di tesi, sono stati presi in considerazione la logica di gestione energetica del progetto originale, chiamata "*a filtro di potenza*" ed una gestione più articolata, utilizzando un parametro aggiuntivo moltiplicativo per la generazione della corrente necessaria all'azionamento. Si rimanda ai paragrafi successivi, per la loro descrizione.

Capitolo 5

5.1 Dimensionamento nuova configurazione

Partendo dal modello precedentemente costruito, il nuovo dimensionamento prevede di limitare la velocità massima del veicolo a 70km/h (circa 19,4 m/s). Questa limitazione è stata considerata valida, dal momento che le applicazioni del veicolo Porter saranno maggiormente di tipo urbano. Tale limitazione prevedrà perciò, anche un nuovo dimensionamento dell'accumulatore al litio e del serbatoio.

5.1.1 Dimensionamento stack e sistema di accumulo

Per poter capire che tipologia di cella a combustibile sia necessaria per questa nuova configurazione, è necessario conoscere la potenza di trazione del veicolo e quella resistente.

L'espressione nota della potenza di trazione P_t è riportata di seguito:

$$P_t = F_t v = (fMg) + \left(\frac{1}{2} \rho SC_x v^2\right) v \quad [W]$$

dove:

F_r = forza resistente del veicolo [N]

F_t = forza di trazione veicolo [N]

α = angolo di pendenza della strada [rad]

v = velocità veicolo [m/s]

f = coefficiente rotolamento = 0,013

M = massa totale veicolo [kg]

g = accelerazione gravità = 9,81 [m/s²]

ρ = densità aria = 1,2 [kg/m³]

SC_x = fattore di resistenza aerodinamica, combinazione della superficie frontale veicolo e del coefficiente di resistenza aerodinamico = 0,916 [m²]

Il valore M della massa totale del veicolo non è conosciuta a priori, dal momento che la massa delle parti elettriche comprendenti il nuovo stack ed il sistema di accumulo, devono essere ancora dimensionati. Si inizia allora un calcolo di tipo iterativo facendo riferimento ai valori già conosciuti di tale massa ed ipotizzandone un valore iniziale pertinente, per quelle parti ancora da dimensionare: si è ritenuto plausibile perciò considerare una massa del pilota e di un carico di media entità di circa 200kg, mentre dalle specifiche tecniche del veicolo, sappiamo che la massa delle parti meccaniche del veicolo di circa 750kg.

Dal precedente studio si è mantenuto uguale il peso di alcuni componenti: motore elettrico 55kg, ausiliari del veicolo 29kg, convertitore della cella a combustibile 38kg.

Per il peso invece del nuovo stack e del nuovo sistema di accumulo, si sono considerati due coefficienti di conversione:

- $5 \cdot 10^{-3}$ kg/W per lo stack
- $9 \cdot 10^{-3}$ kg/Wh per la batteria

Per il serbatoio invece, una volta simulata la prova per calcolare l'autonomia in litri di idrogeno imponendo un percorso complessivo di 150km, si è considerato un rendimento di stoccaggio del 3%. Tale rendimento si ottiene considerando la massa totale di idrogeno necessario per terminare il percorso imposto pari al 3% della massa complessiva di serbatoio e di idrogeno. Il volume che ne è risultato è di circa 55l, con un peso di 40kg, comprensivi dei circa 2kg di idrogeno necessari per l'autonomia considerata. Tenendo conto delle considerazioni precedenti, si è utilizzato inizialmente un valore della massa totale del veicolo M di 1200 kg.

Dai calcoli effettuati, utilizzando le specifiche tecniche del Porter e con l'ipotesi iniziale della massa totale precedentemente detta, è risultata una potenza di trazione di 6923W. Nella tabella seguente vi è indicato un riepilogo dei valori principali utilizzati:

Pt potenza di trazione	6923 [W]
v velocità veicolo	19.4 [m/s]
M massa totale veicolo	1176 [kg]

Tabella 5.1: Principali valori utilizzati nel calcolo della Pt

Per il peso dello stack invece si deve far riferimento al suo dimensionamento, riportato di seguito.

Partendo dal valore della potenza necessaria per la trazione del veicolo P_{ns} , si può calcolare la potenza che è necessario far erogare allo stack considerando i rendimenti dei principali componenti del veicolo, e cioè:

$$\eta_{\text{chopperFC}} = 0,95$$

$$\eta_{\text{chopper}} = 0,95$$

$$\eta_{\text{inverter}} = 0,98$$

$$\eta_{\text{motore}} = 0,9$$

$$\eta_{\text{trasmissione}} = 0,98$$

$$P_{ns} = \frac{P_t}{(\eta_{chopperFC} \eta_{chopper} \eta_{inverter} \eta_{motore} \eta_{choppertrasmissione})} + P_{aux} \text{ [W] potenza cella a combustibile}$$

Il termine P_{aux} , rappresenta la potenza necessaria per l'alimentazione degli organi ausiliari della cella a combustibile, necessari perciò al suo utilizzo e funzionamento. Per trovarne il valore preciso anche in questo caso, sono state effettuate delle iterazioni, in cui inizialmente veniva considerata come circa il 10% P_{ns} . E' stato così trovato un valore numerico di circa 795W.

Il passo successivo è stato quello di determinare alcuni parametri caratteristici della cella a combustibile:

- 1) A = area di diffusione
- 2) n_c = numero di celle

Per poter determinarli si è dovuto prima scegliere il punto di lavoro della cella in base ad alcune considerazioni: si deve fare in modo infatti, che la cella lavori il più possibile vicino alla sua efficienza e potenza massima ottenendo così le massime prestazioni. Come si può vedere dalla curva caratteristica di una cella a combustibile riportata di seguito, tale punto di lavoro si può attestare vicino ad una densità di corrente per cella i , di circa $0.7A/(cm^2)$, corrispondente ad una tensione di cella v_c , di circa $0.65V$.

Ottenendo valori così bassi di tensione per cella, è necessario un certo numero di celle collegate in serie tra loro, per poter fornire il valore di tensione e potenza richiesti da un veicolo.

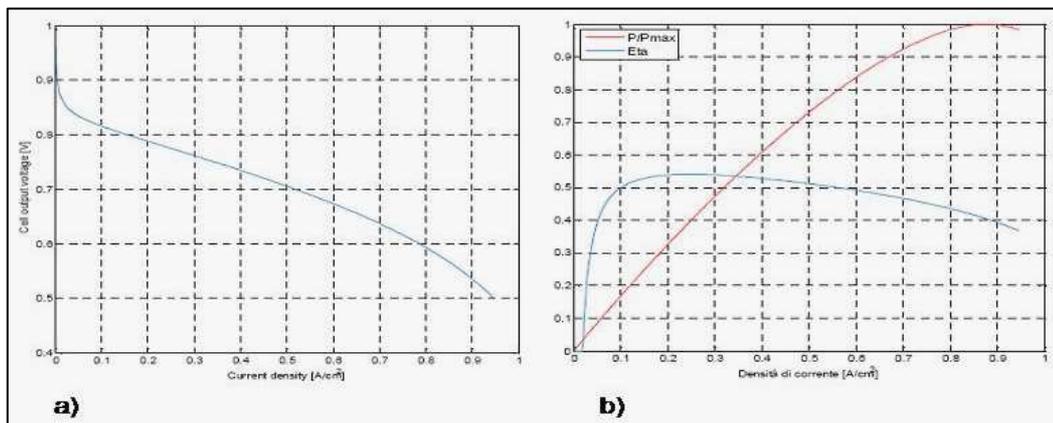


Figura 5.1: a) Caratteristica cella a combustibile; b) Caratteristica rendimento- potenza cella a combustibile

In base alle considerazioni fatte precedentemente, si riporta il calcolo eseguito:

$$A = \frac{P_{ns}}{(n_c v_c i)} \text{ [cm}^2\text{] Area di diffusione}$$

Come si può notare, il numero di celle n_c non può essere determinato a priori: si può allora fare una considerazione riguardante la sicurezza elettrica del sistema, legata all'uso del chopper a valle della cella a combustibile che è bene che non lavori con tensioni troppo elevate. Fissato perciò questo limite a 100V e dividendolo per un coefficiente pari ad 1.1, si è ottenuto un numero minimo di celle pari a 91.

Nello svolgimento dei calcoli si è scelto un numero di celle pari a 93, non volendo né essere troppo precisi nel dimensionamento né usandone un numero troppo alto, prediligendo così un minore ingombro e peso.

Si riportano i valori così trovati, nella seguente tabella:

i densità di corrente cella [A/cm ²]	0.7
v_c tensione di cella [V]	0.65
n_c numero di celle	93
A area diffusione [cm ²]	228

Tabella 5.2: Valori riassuntivi calcolo cella a combustibile

A questo punto, sostituendo il valore della P_t nell'equazione della P_{ns} precedentemente riportata, la potenza che lo stack è necessario eroghi per la propulsione del veicolo, è di circa 10.000[W], valore che sarà determinato in maniera esatta, una volta calcolato il peso preciso di tutto il veicolo con i coefficienti di conversione precedentemente indicati.

Si sono allora eseguite delle iterazioni per trovare il numero di celle di batteria, che hanno dato come configurazione minima un numero di 17 celle. Per gli stessi motivi della scelta del numero di celle dello stack, si è anche qui scelto una configurazione con un numero di celle maggiore, 20 celle, corrispondente a due moduli da 10 celle ciascuno.

Il modello di batteria a cui si è fatto riferimento, è stato il *GMP 36V/20Ah pack*, già utilizzato dal Dipartimento di Sistemi Elettrici e di Automazione (DSEA) della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa in precedenti prove: utilizzando perciò il coefficiente moltiplicativo scritto precedentemente, $9 \cdot 10^{-3}$ kg/Wh, per la batteria il peso complessivo del sistema di accumulo risultante è stato di 13kg.

Calcolata così la potenza approssimata che lo stack deve erogare, in base sia al coefficiente riportato precedentemente di $5 \cdot 10^{-3}$ kg/W sia all'ipotesi fatta di massa complessiva del

veicolo di 1200kg, si è determinato così il peso della cella a combustibile (comprensivo perciò degli ausiliari), di 49 kg.

Conoscendo ora tutti i pesi dei componenti, se ne può fare la somma e trovare la massa precisa e complessiva del veicolo, grazie alla quale si potrà conoscere il valore esatto della potenza da erogare da parte della cella a combustibile.

Il peso che ne è risultato è compatibile con quello ipotizzato inizialmente, confermando così che la potenza di trazione calcolata è sufficiente. In caso contrario, il calcolo iterativo doveva essere iniziato nuovamente, facendo un'ipotesi di massa totale maggiore dei 1200 kg scelti.

Nella tabella seguente si riporta il dimensionamento complessivo del sistema:

M massa totale veicolo	1176 [kg]
M_{FC} massa cella a combustibile + ausiliari	49 [kg]
M_{batteria} massa sistema accumulo	13 [kg]
P_t potenza di trazione	6923 [W]
P_{aux} potenza ausiliari cella a combustibile	795 [W]
P_{ns} potenza cella a combustibile	9670 [W]
n_c numero celle	93
A area diffusione	228 [cm ²]

Tabella 5.3: Dimensionamento complessivo del sistema cella a combustibile + sistema di accumulo

La cella a combustibile che è stata così calcolata ha un vantaggio sostanziale rispetto alla precedente, che aveva una taglia di circa 14kW, sia in termini di peso che di costo.

Si tenga conto che oggi il costo di una cella a combustibile si aggira intorno ai 500\$/kW, perciò senza considerare la batteria al litio che comunque ha un peso economico non trascurabile, un veicolo alimentato ad FC costerà almeno 25000\$, molto di più rispetto allo stesso veicolo equipaggiato con motore a combustione interna (ICE).

A questa spesa, va aggiunta pure quelle riguardanti le infrastrutture e la stessa produzione di idrogeno, che ha il grande problema dello stoccaggio.

Alla luce di queste considerazioni purtroppo l'utilizzo di idrogeno come fonte energetica, è ancora lontano.

Il motore elettrico sempre di tipologia brushless invece, è stato ridimensionato nel seguente modo: partendo sempre dalla potenza di trazione precedentemente calcolata P_t , e dividendola per il rendimento di trasmissione η_t , si è trovata una potenza da erogare da

parte del motore elettrico di circa 7kW. Da questo valore, si è ricavata la velocità angolare utilizzando la velocità massima del veicolo, il raggio di rotolamento ed il valore del rapporto di trasmissione, e conseguentemente, il valore di coppia nominale, tutti dati a disposizione:

$$P_m = \frac{P_t}{\eta} \cong 7000 \text{ W}$$

$$\Omega_m \cong \tau_t \left(\frac{v}{R} \right) \cong 293 \text{ rad/s}$$

$$C_m = \frac{P_m}{\Omega_m} \cong 24 \text{ Nm}$$

dove:

P_m = potenza meccanica motore elettrico [W]

P_t = potenza di trazione del veicolo = 6923W

η = rendimento di trasmissione = 0,98

Ω_m = velocità di rotazione motore elettrico [rad/s]

τ_t = rapporto di trasmissione = $\tau_c \cdot \tau_p = 4$

τ_c = rapporto di trasmissione al cambio = 4

τ_p = rapporto di trasmissione al ponte = 1

v = velocità veicolo = 19,4 m/s

R = raggio di rotolamento = 0,2654 m

C_m = coppia erogata motore elettrico [Nm]

Partendo dal valore calcolato della coppia nominale si è trovata la coppia di spunto e di picco semplicemente facendo una proporzione con il precedente motore elettrico utilizzato, allo stesso modo per i valori di corrente nominale, di spunto e di picco. Dal momento che i valori di coppia nominale sono risultati simili (nel precedente studio era di 28 Nm), si è ritenuta un'approssimazione valida mantenere il peso di 55 kg. Si riporta una tabella riassuntiva dei valori così calcolati :

Corrente nominale [A]	18
Corrente di spunto [A]	25
Corrente di picco [A]	76
Coppia nominale [Nm]	24
Coppia di spunto [Nm]	43
Coppia di picco [Nm]	93
Potenza meccanica [kW]	7
Velocità angolare nominale e massima [rad/s]	293
Peso [kg]	55

Tabella 5.4 Tabella riassuntiva dimensionamento motore elettrico

Capitolo 6

6.1 Gestione energetica a filtro di potenza

Questo tipo di gestione energetica prevede che il *Primary Converter* eroghi un valore di corrente di riferimento I_{FC}^* , calcolato dal *FC Generation System Controller*, in base alle caratteristiche tecniche dello stack e dei relativi sistemi di raffreddamento ed alimentazione: in questo modo si riesce a determinare la portata massica dei reagenti d'aria ed idrogeno in ingresso. La corrente che si ottiene facendo la differenza tra quella erogata dallo stack e quella richiesta dall'azionamento è quella di batteria, I_{ES} . In caso di frenatura ovviamente, la batteria non dovrà erogare corrente, ma verrà ricaricata da quella in arrivo dall'azionamento che inizierà a funzionare come generatore elettrico e non più da motore. Questo funzionamento prende il nome di *regenerative braking* o *recupero in frenatura*. Nella condizione in cui la batteria fosse già carica o avesse finito di ricaricarsi e la frenatura dovesse continuare, non essendo più in grado di accumulare ulteriore energia essendo già arrivata al suo *SOC* (*State of Charge* o *livello di carica*) massimo, allora si ha il dissipamento dell'energia sotto forma di calore.

Si possono scegliere i dati in uscita dal modello, se ne dà un'idea qui di seguito:

Output

I dati in uscita che si ottengono per ogni simulazione fatta riguardano tutti i sottosistemi presenti nel modello e le loro principali caratteristiche.

Alcuni esempi:

- Per il sistema di generazione a celle a combustibile: tensione, corrente e potenza erogate, portata e pressione di idrogeno ed ossigeno, temperatura.
- Per il sistema di accumulo: tensione, corrente, energia e potenza erogate, stima del *livello di carica* - *SOC*.
- Per l'azionamento: corrente in ingresso, specifiche del motore elettrico, caratteristiche di funzionamento dei convertitori.

Prevedendo inoltre l'utilizzo della frenatura elettrica, è prevista anche una stima dell'energia recuperata integrando nel tempo la potenza elettrica fornita dall'azionamento. Si può anche osservare il profilo di velocità imposto e la sua realizzazione istante per istante, il consumo di idrogeno in termini di massa e/o di portata massica.

La gestione energetica intesa come la definizione delle correnti da far erogare ai due sistemi di propulsione, è fondamentale nei veicoli ibridi, nei quali ci potrebbe essere una concomitanza di fonti energetiche differenti, come nel veicolo preso qui in considerazione. Nel caso della presenza di due fonti propulsive, si ha perciò la necessità di capire qual'è e come definire la corrente totale da erogare all'asse del motore elettrico, calcolata come somma delle correnti prodotte dal *Primary Converter* e dal *Litio Battery System*. Stesso discorso valevole in termini di potenze erogate. Da questo discende come un veicolo ibrido abbia come requisito fondamentale per il suo corretto funzionamento, una buona gestione dei diversi flussi energetici e loro interpolazione, in particolar modo del sistema di generazione primario e di batteria. L'*Energy Management System* o *EMS* ha proprio questo compito, di ripartire cioè la richiesta e la produzione di potenza tra i due singoli sistemi di propulsione ed una loro ottimizzazione, avendo come fine ultimo la riduzione dei consumi e degli inquinanti se il *primary system* utilizza una fonte fossile.

All'interno del modello ci sono alcuni aspetti semplificati, come l'omissione della rappresentazione dei carichi ausiliari del veicolo, dal momento che la loro potenza assorbita può essere trascurata perché molto modesta e poco variabile nel tempo. Uno schema di massima più semplificato del precedente ma altrettanto esauriente, è il seguente:

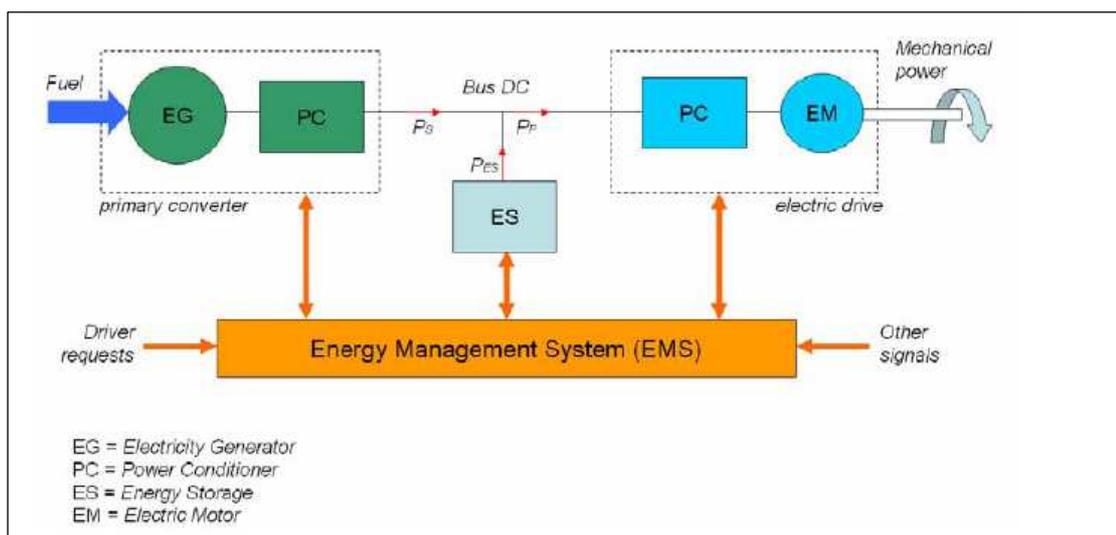


Figura 6.1: Schema semplificato layout veicolo ibrido HEV

Per dare una spiegazione più approfondita e rigorosa del modello si può ricorrere alla dicitura matematica secondo la quale, come già detto, la potenza totale richiesta è la somma di due termini:

$$P_p(t) = P_s(t) + P_{es}(t)$$

dove:

$P_p(t)$ = potenza di propulsione [W]

$P_s(t)$ = potenza erogata dal convertitore primario [W]

$P_{es}(t)$ = potenza erogata (positiva) o assorbita (negativa) dal sistema di accumulo [W]

Nella pratica si ritiene inoltre che la potenza di propulsione, possa essere vista come la somma di un valore medio e di un'oscillazione, chiamata *ripple*:

$$P_p(t) = P_{pm}(t) + r(t)$$

dove:

$P_p(t)$ = potenza di propulsione [W]

$P_{pm}(t)$ = valore medio della potenza di propulsione [W]

$r(t)$ = ripple di potenza a valore medio nullo [W]

Il *ripple*, grandezza variabile nel tempo, può a sua volta essere attribuito al sistema di accumulo in maniera che non vada a disturbare la fonte primaria di propulsione:

$$P_{es}(t) = P_{esm}(t) + r(t) \quad P_s(t) = P_{pm}(t) - P_{esm}(t)$$

dove:

$P_{esm}(t)$ = valore medio della potenza erogata dal sistema di accumulo [W]

$P_s(t)$ = potenza erogata dal convertitore primario [W]

$P_{pm}(t)$ = valore medio della potenza di propulsione [W]

$r(t)$ = ripple di potenza a valore medio nullo [W]

Nella pratica significa che l'erogazione da parte dello *stack* è più lenta rispetto a quella del carico $P_p(t)$ essendo stata filtrata dal *ripple* $r(t)$. Il termine aggiuntivo $P_{esm}(t)$, positivo o negativo a seconda se il funzionamento è in accelerazione o decelerazione, può essere utilizzato in vari modi, dipendendo dalla scelta fatta per la tipologia della gestione energetica imposta.

La *gestione a filtro di potenza*, prende in considerazione proprio l'utilizzo di questa parte di potenza, ed ha inoltre il vantaggio che non fa gravare il *ripple* sullo stack, facendo così in modo che il *Primary Converter* riesca ad ottimizzare il suo punto di lavoro con evidenti vantaggi in termini di rendimento e consumi. Questo è un aspetto fondamentale di tali sistemi di propulsione ibrida, dal momento che ancora oggi hanno un costo molto elevato se paragonato con i classici sistemi di propulsione a combustione interna. Cercare perciò di ottimizzarne il dimensionamento è di essenziale importanza.

Nel modello preso in esame, il termine $P_{esm}(t)$ è stato imposto pari a zero, perciò la formula precedente si riduce a:

$$P_{es}(t) = r(t)P_s(t) = P_{pm}(t)$$

dove:

$r(t)$ = ripple di potenza a valor medio nullo [W]

$P_s(t)$ = potenza erogata dal convertitore primario [W]

$P_{pm}(t)$ = valor medio della potenza di propulsione [W]

Questo significa che il convertitore primario della cella a combustibile ha il solo compito di erogare il valor medio della potenza di propulsione necessaria $P_{pm}(t)$, lasciando così il controllo del *ripple* alla batteria: nella pratica si realizza come detto precedentemente, e cioè con la batteria che contribuirà a fornire energia in fase di accelerazione e ad accumulare energia per quanto possibile, durante la frenatura e a non erogare durante la marcia in rettilineo.

Un primo passo perciò per il dimensionamento dello *stack*, è quello di avere un'idea di massima della potenza media di propulsione $P_{pm}(t)$: per poter avere questo valore, o a priori si conoscono il percorso da far seguire al veicolo, le sue caratteristiche e le sue prestazioni come nel presente caso, oppure si fa una stima della potenza $P_p(t)$, rilevandone l'andamento per un certo lasso di tempo.

Si può fare un'approssimazione iniziale della $P_{pm}(t)$, facendone un filtraggio.

In variabili di Laplace si può scrivere che :

$$P_{pm}(s) = \frac{P_p(s)}{(1 + s\tau)}$$

dove:

$P_{pm}(s)$ = valor medio della potenza di propulsione [W]

$P_p(s)$ = potenza di propulsione [W]

s = variabile di Laplace

τ = costante di tempo del filtro [s]

Imponendo un filtro così fatto, l'EMS obbliga il convertitore primario a seguire una corrente di riferimento. Passando perciò in termini di correnti:

$$I_{fc}^*(s) = \frac{I_{ed}(s)}{(1 + s\tau)}$$

dove:

$I_{fc}^*(t)$ = corrente di riferimento del convertitore primario [A]

$I_{ed}(t)$ = corrente assorbita dall'azionamento [A]

s = variabile di Laplace

τ = costante di tempo del filtro [s]

Nel calcolare la corrente di riferimento $I_{fc}^*(t)$, la gestione a filtro di potenza tiene di conto anche del livello di carica o SOC (State of Charge) della batteria, per cui a seconda del suo valore, viene fatta intervenire in modo più o meno marcato.

La gestione a filtro di potenza prevede perciò che la corrente erogata in ingresso all'azionamento, sia corretta in base a delle soglie ben precise del livello di SOC come evidenzia lo schema sottostante:

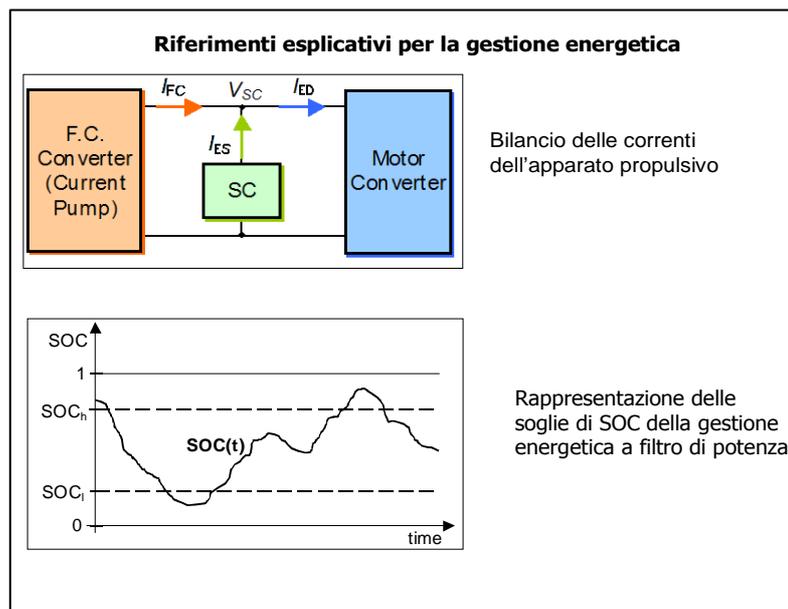


Figura 6.2: Gestione a filtro di potenza originale

Schematizzando si ha:

1. per $SOC_h \leq SOC < 1 \Rightarrow I_{ED} = \min(I_{ES \max}, I_{ED}), I_{FC} = 0$

e quindi si ha che se il SOC supera il valore SOC_h allora tutta la potenza viene fornita dalla batteria, che scaricandosi, può essere così in grado di ricaricarsi con una eventuale frenata.

2. per $SOC_l < SOC < SOC_h \Rightarrow I_{FCf}(s) = \frac{I_{ED}(s)}{1 + ts}$

e quindi se il valore della I_{ED} è pari al valore filtrato $I_{FC}(s)$ allora il SOC si mantiene entro un intervallo di valori, delimitato dal SOC_h superiore ed da quello inferiore SOC_l .

3. per $0 \leq SOC < SOC_l \Rightarrow I_{FC} = I_{FC \max}$

e quindi si ha che se il SOC va al di sotto del valore SOC_l , eroga tutta la potenza la FC, evitando che l'accumulo si scarichi del tutto.

dove:

$I_{FC}(s)$ = corrente erogata dal convertitore primario [A]

$I_{ES}(s)$ = corrente erogata dal sistema di accumulo [A]

$I_{ED}(s)$ = corrente assorbita dall'azionamento [A]

s = variabile di Laplace

t = costante di tempo del filtro [s]

Durante il funzionamento del veicolo perciò, viene aggiornata costantemente la corrente di riferimento calcolata in base al livello di carica della batteria e richiesta dall'azionamento.

Se il SOC è compreso nella fascia centrale tra un valore massimo SOC_h e minimo SOC_l , allora il sistema eroga una corrente pari a quello filtrato $I_{FC}(s)$. Contrariamente, se la batteria è molto carica e perciò il SOC è compreso tra 1 ed il valore di SOC_h , allora la stack non eroga più corrente $I_{FC} = 0$, facendo lavorare solo la batteria. Se invece la batteria è molto scarica, e perciò il SOC è compreso tra 0 ed il valore SOC_l , la FC ha il compito di erogare la sua corrente massima $I_{FC} = I_{FC \max}$.

Tale gestione sicuramente corretta, non prende in considerazione però né la ricarica della batteria da parte dell'azionamento che in frenatura si comporta da generatore e quindi va a ricaricare la batteria, né i casi in cui ci sia una richiesta di potenza considerevole, durante i quali la batteria si scaricherebbe velocemente e lo stack non provvederebbe così alla sua ricarica.

Per questi motivi è stata introdotta una gestione nuova delle correnti che prende in considerazione anche questi due ultimi aspetti.

6.2 Nuova gestione energetica con fattore moltiplicativo K

Le strategie per il controllo dei veicoli ibridi, sono solitamente mirate alla minimizzazione dei consumi ed al miglioramento della guidabilità. I veicoli ibridi *HEV*, avendo a bordo due o più sorgenti di energia, hanno oltre al problema della gestione istantanea dei dispositivi di propulsione, quello del livello di carica della batteria, *SOC*, che deve essere mantenuto entro certi limiti.

In un veicolo ibrido, la potenza alle ruote è data dal contributo, in questo nostro caso, della potenza di fuel cell e della batteria, perciò l'ottimizzazione istantanea, riguarda proprio la gestione di queste due tipologie di fonti energetiche, legata alla richiesta di potenza da parte del guidatore. Tale gestione, deve essere effettuata tenendo in massimo conto il consumo di combustibile: questo può essere fatto o basandosi sulle mappe dei rendimenti della *FC* e della batteria, considerando i punti di funzionamento ottimali, oppure con una loro parametrizzazione, come è stato fatto in questo lavoro, utilizzando una funzione K . L'andamento di tale funzione permette al *SOC* di oscillare entro alcuni limiti, calcolati per avere migliori consumi possibili, ma allo stesso tempo non permette che il *SOC* si allontani troppo dai target voluti di utilizzo. Per rispettare i limiti del livello di carica della batteria, è usato questo fattore correttivo K , per avere puntualmente l'erogazione migliore di potenza, in base alla differenza tra il valore reale dello stato di carica e quello richiesto. Questo avviene grazie al fatto che la funzione è costruita in modo tale da avere un andamento lineare nel tratto intermedio, affinché si abbiano i massimi benefici nell'utilizzo dell'energia messa a disposizione a bordo veicolo, mentre un andamento più ampio e non lineare agli estremi, in corrispondenza dei valori di *SOC* alti e bassi, si possa evitare che la batteria arrivi ad essere scarica o in sovraccarico. Il suo andamento chiaramente sarà costruito matematicamente in base alle caratteristiche di carica e scarica della tipologia di batteria utilizzata. Questa tipologia di gestione è stata già collaudata precedentemente a questo lavoro, dando ottimi risultati (per ulteriori approfondimenti, si rimanda in bibliografia). Si rimanda al paragrafo 6.3.1.2, per una descrizione più approfondita dell'implementazione all'interno del modello.

Durante il funzionamento del veicolo si cerca di far funzionare la batteria con *SOC* compresi nell'intervallo $0.3 \div 0.8$, in maniera da avere la possibilità di recupero d'energia durante un'eventuale frenatura, di utilizzare la batteria contemporaneamente alla fuel cell,

ed anche perché per alcune tipologie di batterie, tale intervallo corrisponde alla maggior efficienza.

Nei casi in cui il livello di *SOC* dovesse uscire da tale intervallo, il valore viene appunto corretto dalla funzione *K* aggiunta nel modello.

Nel tratto centrale corrispondente all'intervallo $0.3 < SOC < 0.8$, la curva sarà rettilinea e con valore pari ad un, in maniera che la corrente d'azionamento richiesta, sia uguale al valore filtrato del modello e pari a:

$$I_{FC}^*(s) = \frac{I_{ED}(s)}{(1 + s\tau)}$$

Contrariamente agli estremi della funzione *K*, si impone un andamento curvilineo dovendo su esempio del seguente grafico 2D:

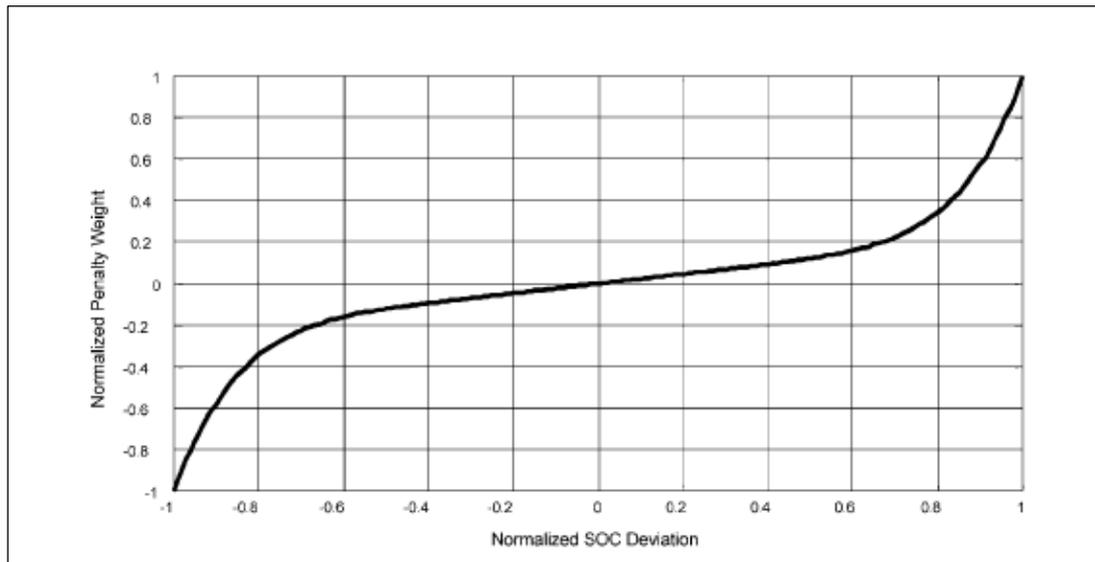


Figura 6.3: Esempio di andamento funzione K

In realtà, la rappresentazione corretta della funzione *k* sarà un grafico 3D, dovendo estendere il suo dominio anche ai valori della corrente d'azionamento I_{ED} .

Si avrà perciò una superficie con in asse delle ascisse il *SOC*, la I_{ED} nell'asse delle ordinate, i valori *k* in quella della zeta. Il grafico della funzione sviluppata in questo lavoro, è la seguente:

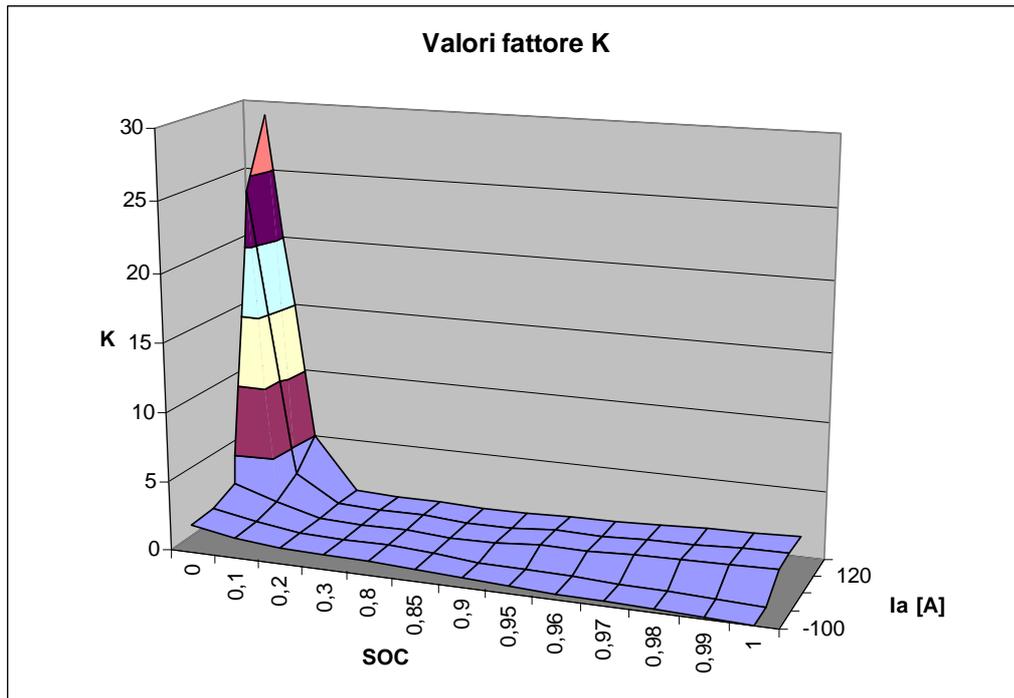


Figura 6.4: Andamento funzione K – vista frontale

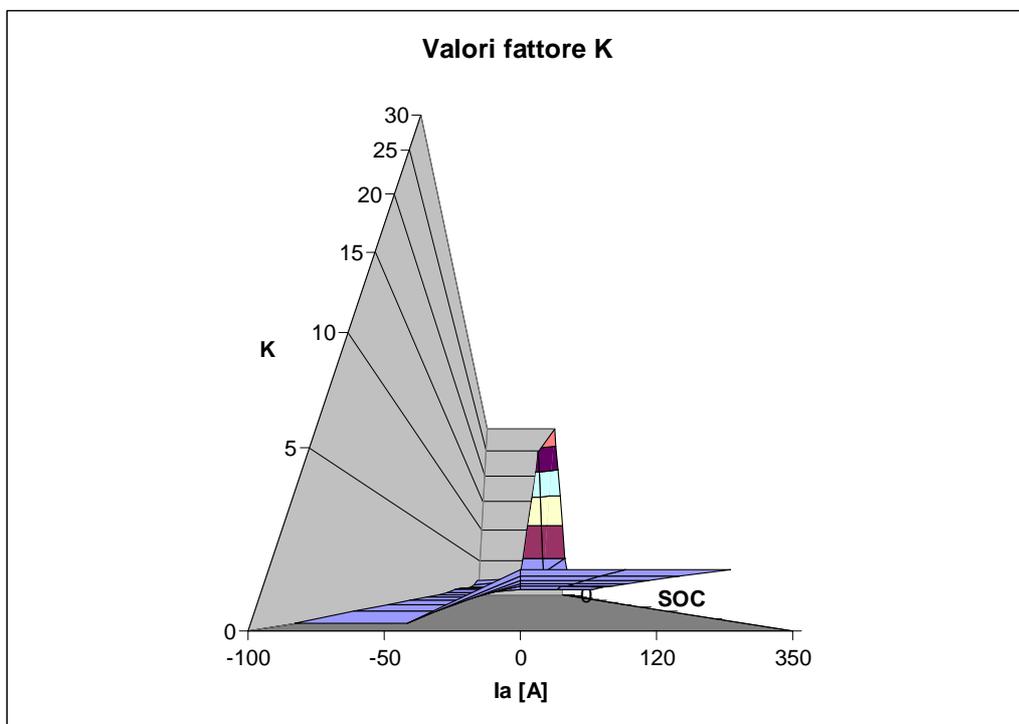


Figura 6.5: Andamento funzione K - vista laterale

Differentemente dal modello con gestione a filtro di potenza per cui si hanno tre fasce ben definite e fisse del SOC , per cui il sistema gestisce la corrente da erogare all'azionamento, in questo nuovo modello usando questa funzione K , si gestisce la modulazione della corrente da erogare all'azionamento in base ai valori di input di corrente di azionamento I_{ED} e di SOC , facendo una distinzione di tre casi ben definiti e tenendo di conto di alcune situazioni critiche:

- se risulta $I_{ED} > 0$ significa che il veicolo è in trazione.
- se risulta $I_{ED} < 0$ significa che si ha il recupero in frenatura
- se risulta $0.1 < SOC < 0.3$ significa che la batteria è scarica e che si può ricaricare con l'aiuto della FC o con la frenatura elettrica.
- se risulta $0.8 < SOC < 1$ significa che la batteria essendo molto carica, può essere scaricata con l'uso diretto.

Durante il funzionamento infatti, si possono presentare situazioni in cui se la batteria è scarica, dovrebbe essere ricaricata in previsione di un improvvisa richiesta di potenza: questo può avvenire in caso di recupero in frenatura, nel qual caso alla FC non è richiesto erogare corrente aggiuntiva oppure, se la richiesta da parte dell'azionamento è sostanziosa, la FC deve servire sia per la trazione del veicolo sia per la ricarica della batteria stessa. E' quindi necessario che ci sia una differenziazione tra i valori positivi e negativi della I_{ED} richiesta o erogata, per poter considerare questi due aspetti.

Quando invece la batteria è carica e se la richiesta da parte dell'azionamento è lieve, la FC può evitare di erogare corrente aggiuntiva lasciando alla batteria l'erogazione principale, almeno fino a quando o non si sia scaricata a tal punto che si rende necessario ricaricarla, oppure la corrente d'azionamento è così elevata, che il solo apporto della batteria non basta e la FC è così richiamata ad erogare corrente aggiuntiva.

Da un punto di vista matematico si può descrivere la nuova gestione nel seguente modo, facendo riferimento al seguente schema:

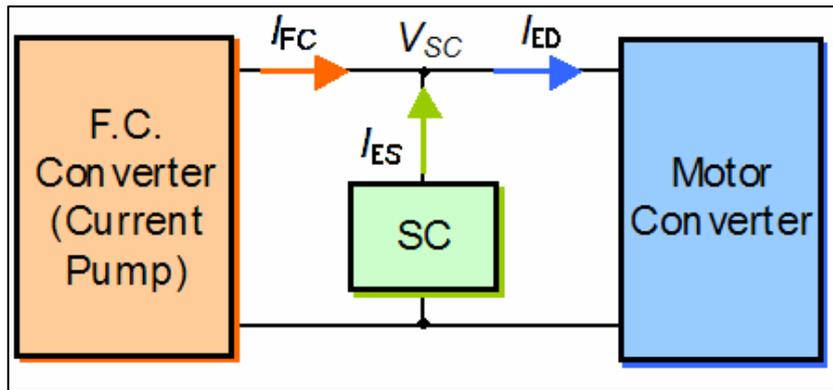


Figura 6.7 Riferimento per il bilancio delle correnti per la nuova gestione energetica

1. per $0 \leq \text{SOC} < 0.3$ si ha che:

$$\text{se } I_{ED} > 0 \Rightarrow I_{FC} = \min(I_{FC \max}, I_{ES \max} + I_{ED})$$

e quindi per SOC bassi ed avanzamento del veicolo ($I_{ED} > 0$), la corrente erogata proviene tutta dalla FC e può variare dal suo valore massimo $I_{FC \max}$ al suo valore minimo $I_{ES \max} + I_{ED}$, a seconda della potenza richiesta dall'azionamento.

$$\text{se } I_{ED} < 0 \Rightarrow I_{FC} = (0, I_{ES \max} + I_{ED})$$

e quindi per SOC bassi ed in caso di frenatura ($I_{ED} < 0$), la corrente recuperata va a ricaricare la batteria e la corrente di FC si annulla temporaneamente, a meno che non ci sia una brusca richiesta di potenza, per cui assume il valore ($I_{ES \max} + I_{ED}$).

2. per $0.3 \leq \text{SOC} \leq 0.8 \Rightarrow I_{FCf}(s) = \frac{I_{ED}(s)}{1 + \tau s}$

e quindi nella fascia centrale del SOC, la corrente erogata dalla FC è pari a quello

$$\text{filtrato } I_{FCf}(s) = \frac{I_{ED}(s)}{1 + \tau s}.$$

3. per $0.8 < \text{SOC} \leq 1$ e $I_{ED} > 0$ si ha che:

$$\text{se } I_{ED} \leq I_{ES \max} \Rightarrow I_{FC} = I_{ES \max}$$

$$\text{se } I_{ED} \geq I_{ES \max} \Rightarrow I_{FC} = (I_{ES \max} + I_{FC})$$

e quindi per SOC alti ed in caso d'avanzamento del veicolo, la corrente erogata è solo quella di batteria se è in grado di provvedere da sola all'erogazione ($I_{ED} \leq I_{ES \max}$), altrimenti se la richiesta di corrente è troppo elevata ($I_{ED} \geq I_{ES \max}$), viene coadiuvata dalla corrente di FC.

4. $0.8 < \text{SOC} \leq 1$ e $I_{ED} < 0 \Rightarrow I_{FC} = 0$

e quindi nel caso la batteria sia completamente carica, la corrente erogata è appunto solo quella di batteria, per poterla così scaricare in previsione di un eventuale recupero di energia e sfruttarla più profondamente.

dove:

$I_{FC}(s)$ = corrente erogata dal convertitore primario [A]

$I_{ES}(s)$ = corrente erogata dal sistema di accumulo [A]

$I_{ED}(s)$ = corrente richiesta o generata dall'azionamento [A]

s = variabile di Laplace

t = costante di tempo del filtro [s]

		$I_{ED} < 0$	$I_{ED} > 0$
SOC BASSO	0÷0.3	$I_{FC} = I_{FC\text{hf}}$ $= (I_{ES\text{max}} + I_{ED})$	$I_{FC} = I_{FC\text{hf}} = I_{FC\text{max}}$
SOC INTERMEDIO	0.3÷0.8	$I_{FC} = I_{ED\text{f}}$	$I_{FC} = I_{ED\text{f}}$
SOC ALTO	0.8÷1	$I_{FC} = I_{FC\text{lf}} = 0$	$I_{FC} = I_{FC\text{lf}}$

Tabella 6.1: Tabelle riassuntiva gestione K moltiplicativo

Utilizzando i due profili di velocità chiamati l'ECE15-EUDC e MICROCICLO URBANO di cui se ne dà una descrizione successivamente, la funzione K è stata calibrata in maniera da dare la gestione sopra descritta con attenzione ai valori di I_{FC} uscenti.

Infatti, nel calibrare i valori numerici della funzione, si è cercato di far erogare una corrente I_{FC} prossima a quella nominale di stack nel profilo extraurbano: così facendo si assicura un utilizzo della FC prossimo al suo rendimento massimo, garantendo così efficienza, consumi e costi minori.

6.3 Configurazioni esaminate

Il veicolo HEV finora descritto è stato simulato, come nel modello originale con la gestione a filtro di potenza, con la differenza che lo *stack* è stato dimensionato per una velocità massima del veicolo di 70 km/h (19,4 m/s): questa riduzione di velocità rispetto agli 80 km/h originali, è giustificata dal fatto che il Piaggio-Porter, date le sue dimensioni ridotte, è destinato ad un uso prevalentemente cittadino, avendo inoltre l'opportunità di contribuire all'abbattimento delle emissioni inquinanti a livello locale, grazie alla possibilità di utilizzarlo con propulsioni alternative. La velocità massima così ridotta, risulta perciò sufficiente, se confrontata con i normali mezzi privati.

Chiaramente anche il sistema di accumulo ha subito un ridimensionamento, portando così vantaggi anche in termini di ingombri e pesi, oltre che di costi.

Le simulazioni fatte sono state suddivise tra la gestione a *filtro di potenza* e quella con il fattore moltiplicativo K e successivamente confrontate:

1. Schema di veicolo ibrido HEV alimentato con fuel cell e batteria al litio con gestione energetica a filtro di potenza.
2. Schema di veicolo ibrido HEV alimentato con fuel cell e batteria al litio con gestione energetica con fattore moltiplicativo K .

6.3.1 Dettaglio casi esaminati

6.3.1.1 Gestione energetica a filtro di potenza

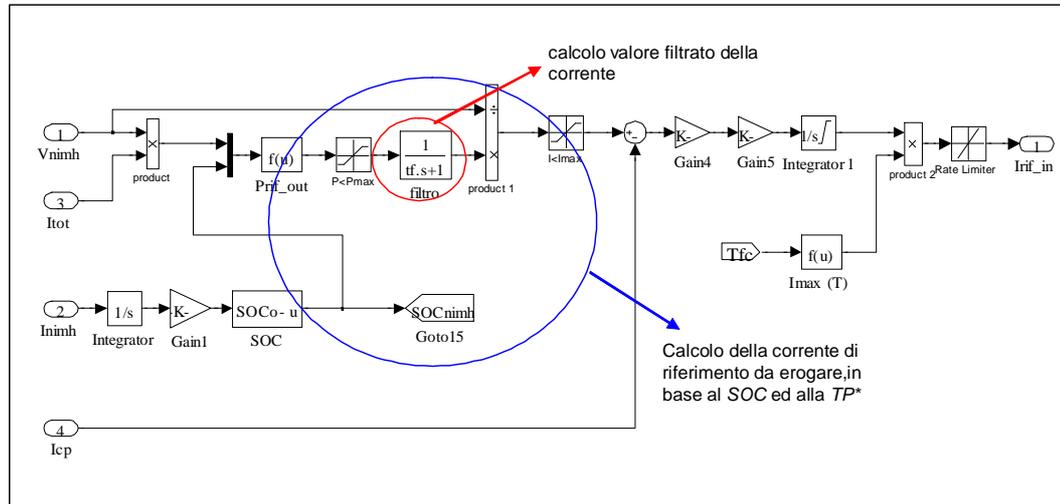


Figura 6.8: Interfaccia grafica modello in Matlab - Simulink, rappresentante il controllore della FC e del sistema di accumulo, dove viene eseguito il calcolo della corrente di riferimento

Nella figura precedente, si può vedere come sia strutturato il modello per il calcolo della corrente da erogare. Si vede come, avendo in input la variazione del SOC e la potenza richiesta, calcoli il valore della corrente filtrata.

Il profilo di velocità ECE15EUDC che è stato utilizzato nelle simulazioni iniziali, è normalmente utilizzato per misurare le emissioni inquinanti dei veicoli ed è composto da quattro cicli urbani limitati ad una velocità di 50km/h ed uno extraurbano limitato a 70 km/h (nella realtà questo ultimo tratto avrebbe una velocità di 120km/h).

Il suo profilo è rappresentato nella figura seguente:

1) Prova con profilo ECE15-EUDC

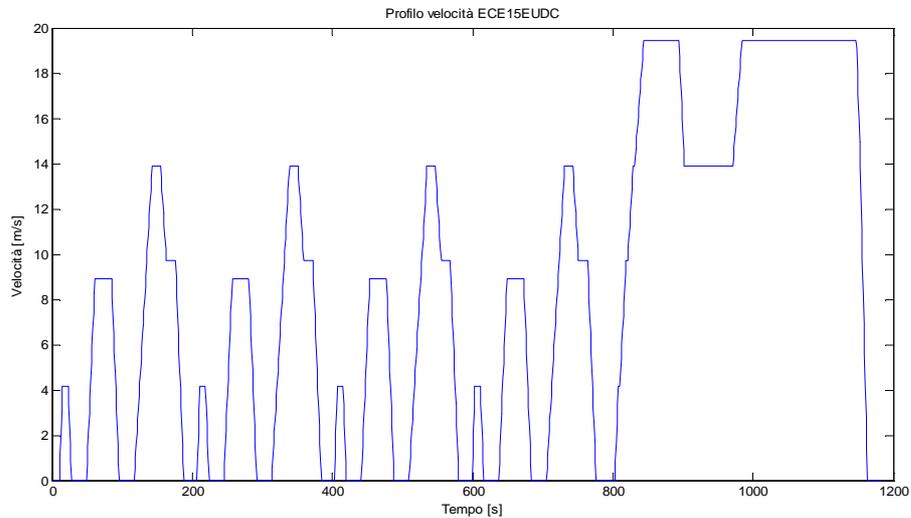


Figura 6.9: Profilo di velocità ECE15EUDC

Imponendo un profilo di questo tipo per un tempo totale di 1200 s circa, si vuole simulare un utilizzo che più si avvicina a quello cittadino in cui sono presenti frequenti accelerazioni e decelerazioni.

2) Prova con profilo EXTRAURBANO

3)

Come già detto, per il calcolo della grandezza del serbatoio, si è imposta un'autonomia del veicolo di 150km alla sua velocità massima di 70km/h. Il profilo perciò è composto da una prima rampa di accelerazione ed un andamento rettilineo che ripercorre 150 Km alla velocità costante di 70km/h.

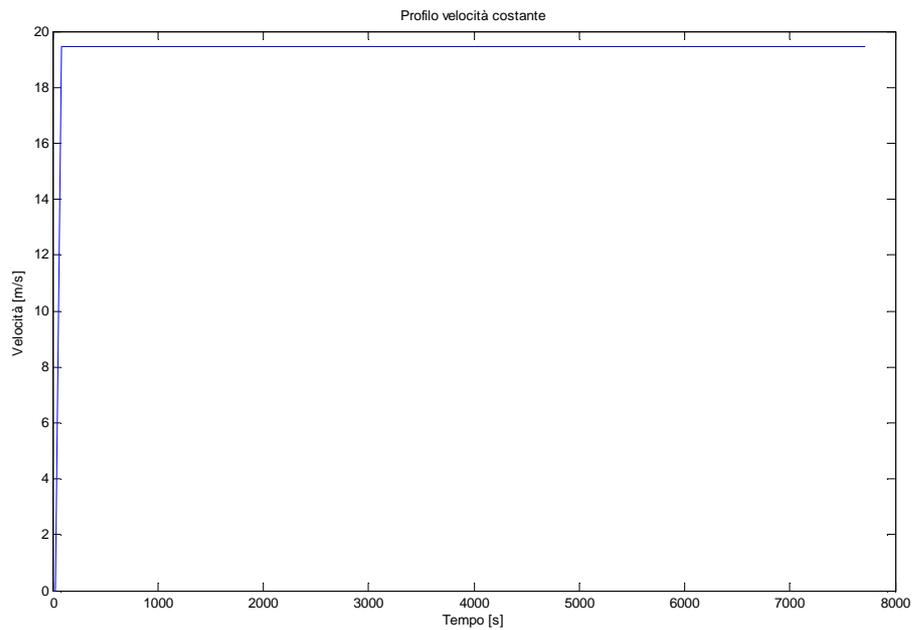


Figura 6.10: Profilo di velocità costante

Imponendo un profilo di questo tipo si vuole riuscire a definire l'autonomia del serbatoio da utilizzare, affinché l'idrogeno immagazzinato sia sufficiente per il chilometraggio definito.

Si può inoltre capire quale siano i rendimenti effettivi dei vari sottosistemi, quali motore elettrico e convertitori dell'azionamento.

6.3.1.2 Gestione energetica con fattore moltiplicativo K

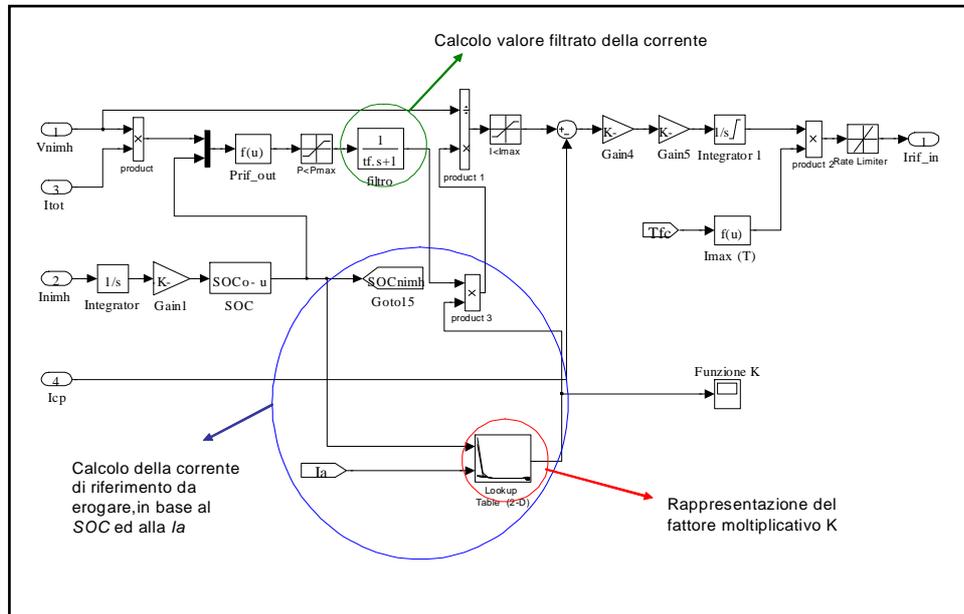


Figura 6.11: Interfaccia grafica modello in Matlab - Simulink, rappresentante il controllore modificato col fattore della FC e del sistema di accumulo, dove viene eseguito il calcolo della corrente di riferimento

Nella figura precedente si può notare come sia rappresentata la funzione K della nuova gestione energetica. In simulink il blocco look up-table, permette di rappresentare una matrice avente come dati in ingresso, i parametri desiderati, sotto forma di due vettori riga e colonna. In questo caso i due vettori sono rappresentati dai parametri del SOC e della I_{ED} , i cui valori, variando in base al profilo di velocità imposto durante le simulazioni, vengono corretti proprio dal valore che si fa corrispondere al coefficiente K all'interno della matrice della look up table. I valori così assegnati al k , moltiplicano istantaneamente la corrente filtrata calcolata dall'altro ramo del modello come indicato in figura, facendo in modo che tale quantità di corrente sia tale da far rimanere il SOC il più a lungo possibile all'interno della fascia $0.3 \div 0.8$ e cercando di evitare le zone estreme. Facendo in questo modo si ha la sicurezza che ci si trovi sempre in condizioni tali da affrontare qualsiasi richiesta di corrente da parte dell'azionamento, mantenendo la possibilità di recupero in frenata.

1) Prova con profilo ECE15-EUDC

Come per la gestione a filtro di potenza, anche per questa nuova gestione si è utilizzato il profilo ECE15EUDC:

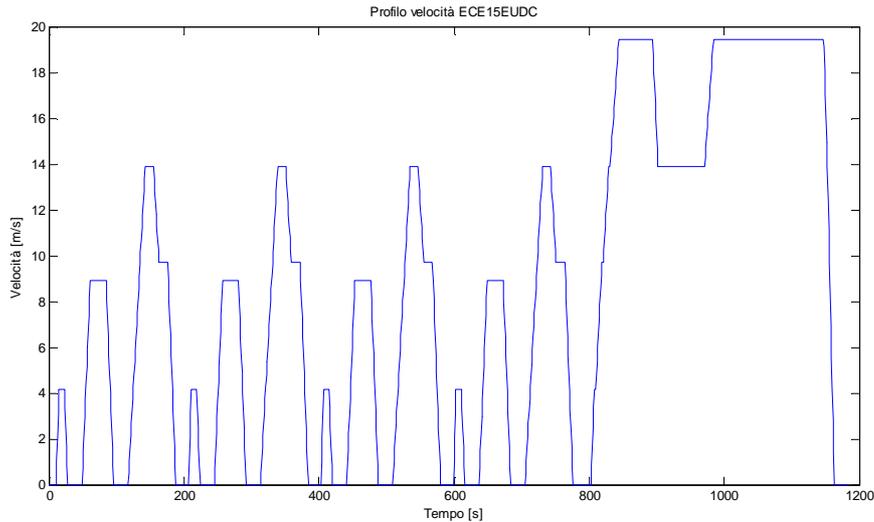


Figura 6.12: Profilo di velocità ECE15EUDC

2) Prova con profilo MICROCICLO URBANO

Diversamente invece dalla gestione a filtro di potenza, per quella con il K moltiplicativo, si è utilizzato anche un profilo di velocità che presenta due rampe di accelerazione e decelerazione. Utilizzando questo profilo ed eseguendo una serie di prove, si è potuto confrontare gli andamenti delle grandezze più significative e verificare che le ipotesi fatte ed attese riguardo consumi e prestazioni, sono realistiche.

Questo profilo è stato scelto appositamente per questa gestione, come ulteriore conferma della sua validità e correttezza. A questo riguardo, poteva essere scelto un profilo di altra forma e caratteristica.

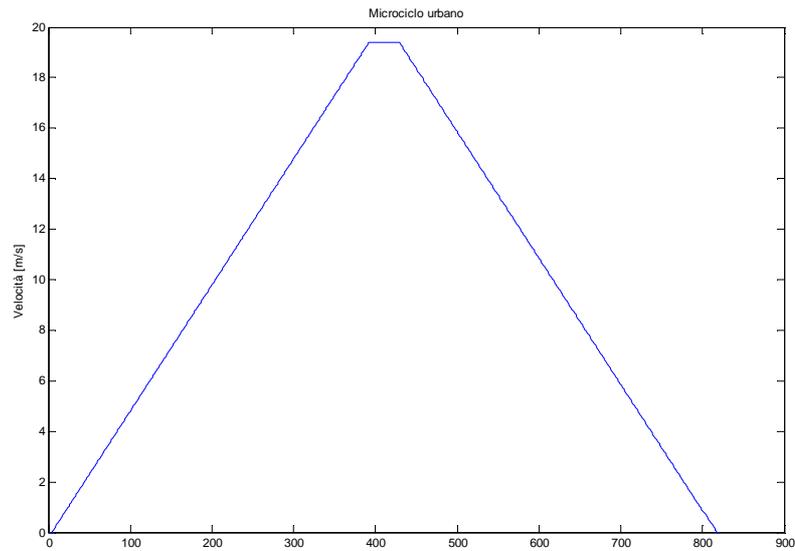


Figura 6.13: Profilo di velocità MICROCICLO URBANO

6.4 Risultati

Dalle simulazioni fatte con i vari profili di velocità, è stato confermato che la nuova gestione delle potenze di stack e batteria è corretta e comporta una migliore distribuzione della potenza, dei consumi ed un migliore sfruttamento della batteria.

I profili utilizzati sono stati scelti l'ECE15EUDC per avere un paragone diretto con la precedente gestione, il profilo chiamato MICROCICLO URBANO per avere una conferma ulteriore di quello che era già stato studiato, e quello a VELOCITA' COSTANTE per poter calcolare l'autonomia del veicolo.

Per semplicità si riportano alcuni grafici, che fanno capire meglio i risultati ottenuti.

- **MICROCICLO URBANO-CONSUMO DI IDROGENO [g]**

Per quanto riguarda il consumo di idrogeno si può effettuare un confronto diretto tra le due gestioni. Si può notare che, mentre nella fascia centrale del livello dello stato di carica (0,3÷0,8), gli andamenti sono pressoché coincidenti come ci aspettavamo, dal momento che in tale fascia del SOC, la funzione K è calibrata con un valore pari ad 1: ciò significa che dà in risposta una corrente risultante pari proprio a quello filtrato, uguale nelle due gestioni, invece nelle fasce estreme per SOC alti e bassi, il consumo è diverso, come ci si può aspettare in base alle considerazioni fatte.

A bassi SOC, dal momento che la batteria non è in grado di erogare sufficiente energia ed anzi avendo bisogno di essere ricaricata, la propulsione è determinata principalmente dallo stack: è giusto perciò aspettarsi un consumo più elevato di idrogeno rispetto alla gestione precedente, dove non veniva considerata la possibilità di sfruttare solamente lo stack, a questi livelli di SOC, sia per la propulsione che per la ricarica. Analogamente per alti valori di SOC, si ha la situazione inversa: dal momento che la batteria è molto carica, si vuole sfruttarla sia per la propulsione, sia per l'utilizzo in sé della batteria, sia perché così si ha un'alta probabilità che in caso di frenatura, sia pronta per un riaccumulo di energia, essendosi in parte scaricata per la propulsione. I consumi di idrogeno infatti sono così più bassi, dato che lo stack eroga meno corrente, almeno fino a che la batteria o non ritorna nella sua fascia di funzionamento principale o non ci sia bisogno di un aumento repentino della potenza: in questo caso lo stack inizierebbe ad erogare più corrente e potenza.

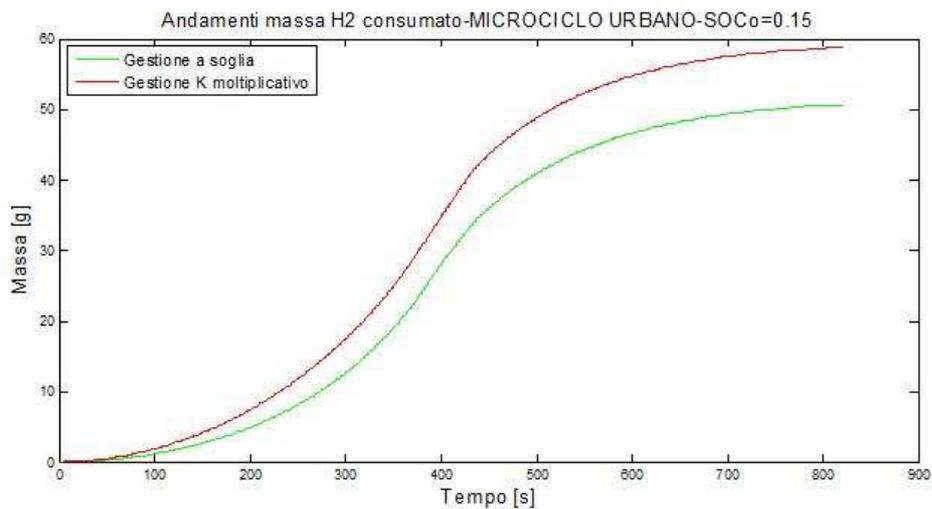


Figura 6.14 Andamenti massa di idrogeno consumato-MICROCICLO URBANO per SOC₀=0.15

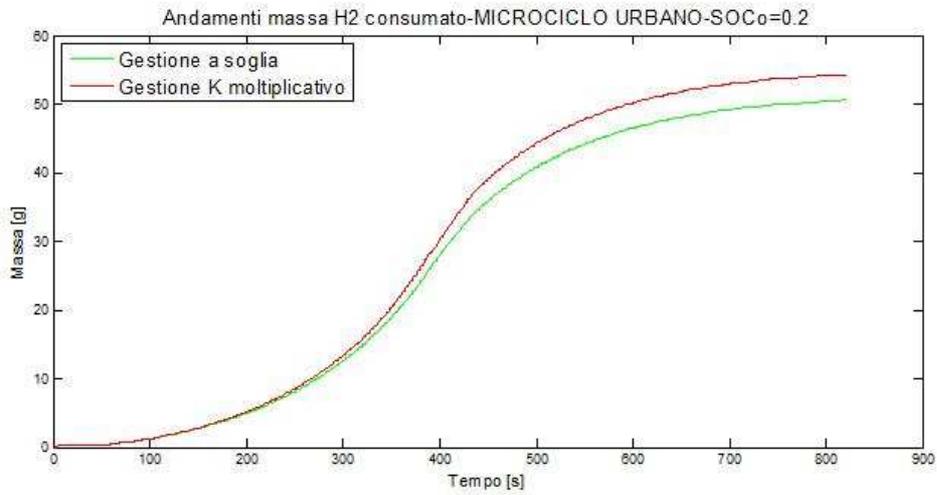


Figura 6.15 Andamenti massa di idrogeno consumato-MICROCICLO URBANO per SOC0=0.2

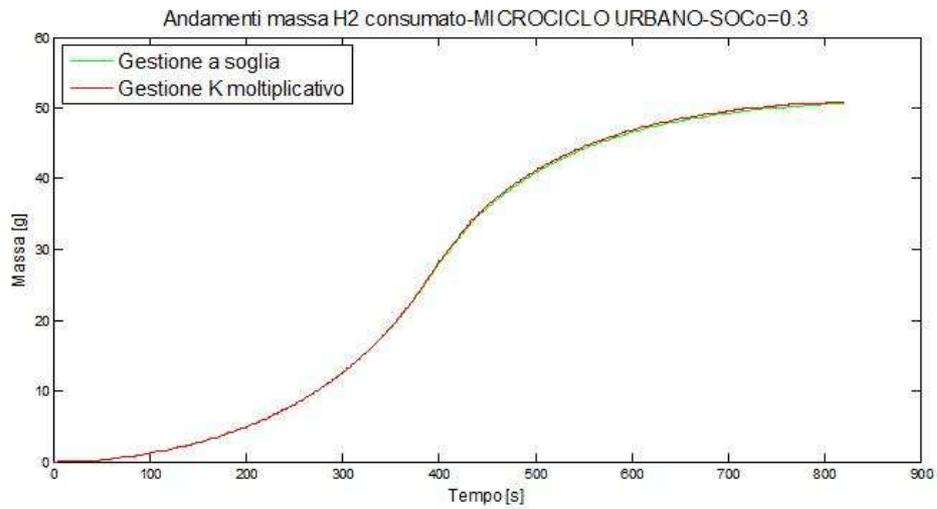


Figura 6.16 Andamenti massa di idrogeno consumato-MICROCICLO URBANO per SOC0=0.3

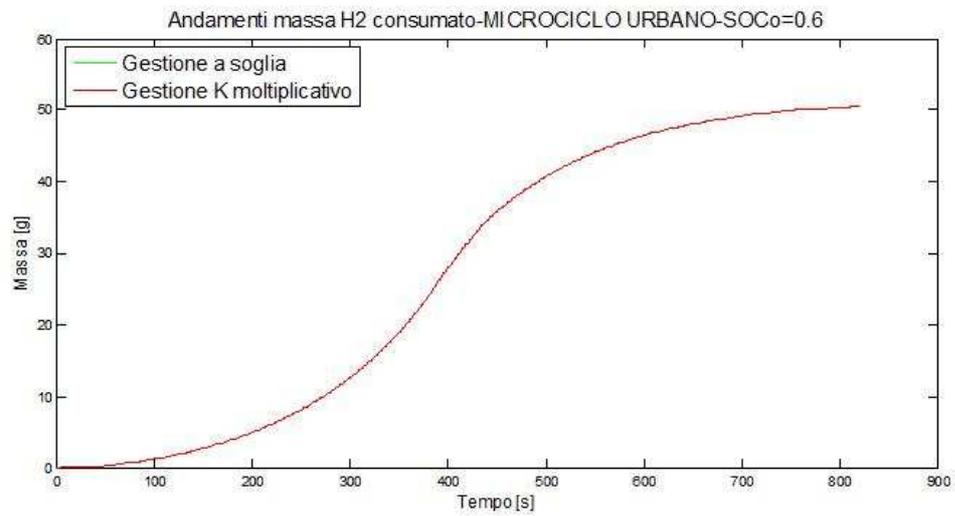


Figura 6.17 Andamenti massa di idrogeno consumato-MICROCICLO URBANO per SOC₀=0.6

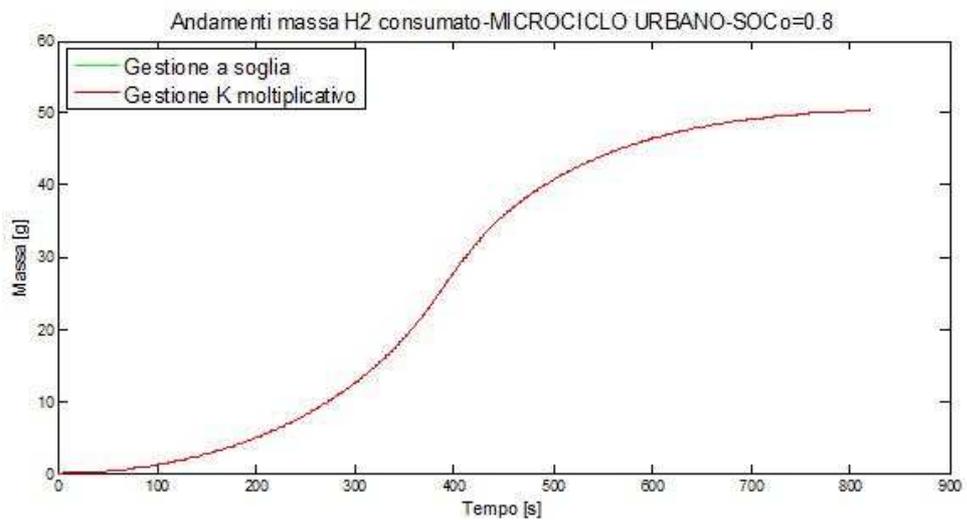


Figura 6.18 Andamenti massa di idrogeno consumato-MICROCICLO URBANO per SOC₀=0.8

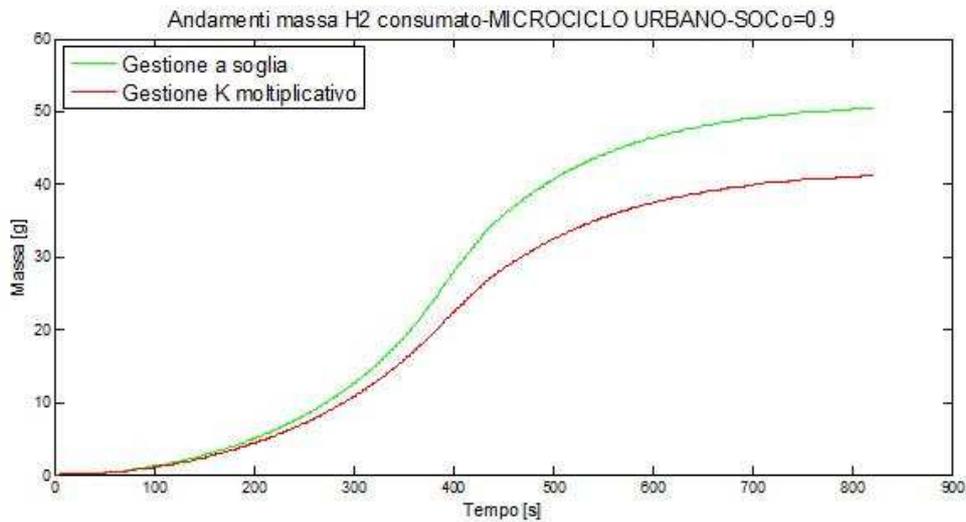


Figura 6.19 Andamenti massa di idrogeno consumato-MICROCICLO URBANO per SOC₀=0.9

- **MICROCICLO URBANO - ANDAMENTO SOC**

Come per il consumo della massa di idrogeno, anche per la variazione dell'andamento del SOC di batteria ci aspettiamo un andamento pressoché uguale, tra le due gestioni, nella fascia centrale 0.3÷0.8, come infatti dimostrano i grafici seguenti. Nella fasce estreme invece gli andamenti saranno differenti dato il diverso utilizzo della batteria. Per SOC bassi infatti, si vede che il livello di carica della batteria cresce in accordo del fatto che lo stack, oltre ad erogare corrente per la propulsione del veicolo, sta anche ricaricandola. Al contrario invece per SOC alti, dato che è la batteria che ha il compito di erogare corrente, il SOC diminuirà. Questa condizione chiaramente rimarrà tale fino a quando non ci sarà un eventuale recupero in frenatura o un brusco aumento di corrente, dovuta per esempio, ad un aumento di velocità o di pendenza stradale.

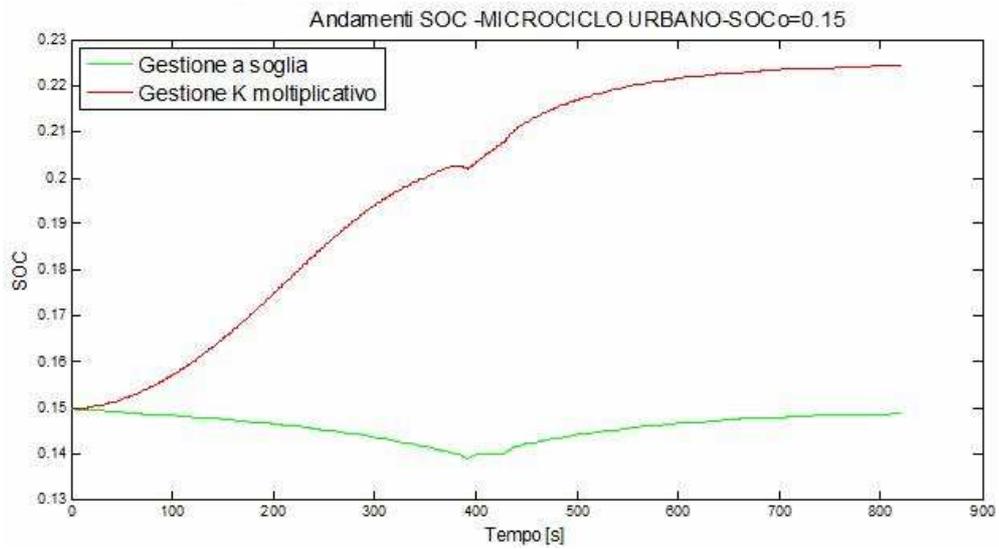


Figura 6.10 Andamenti SOC-MICROCICLO URBANO per SOC α =0.15

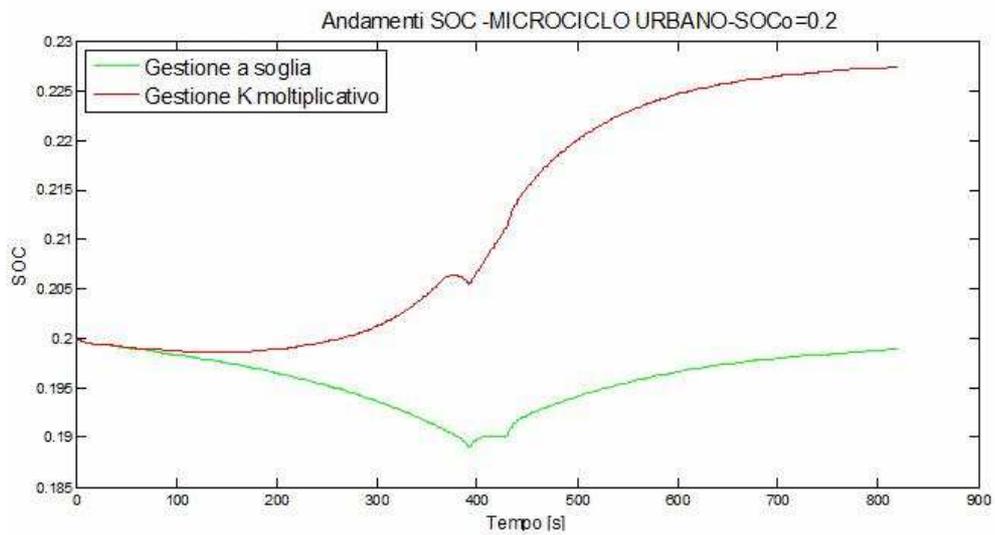


Figura 6.21 Andamenti SOC-MICROCICLO URBANO per SOC α =0.2

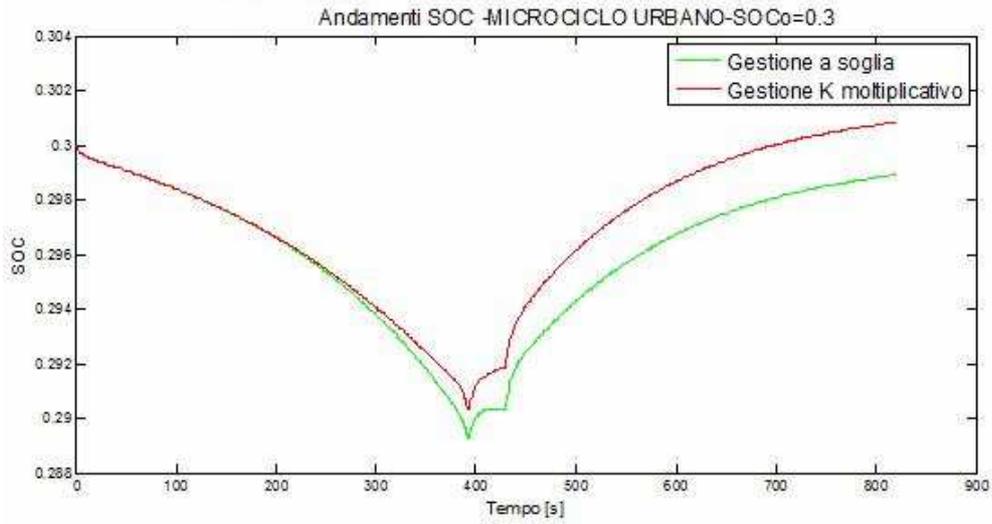


Figura 6.22 Andamenti SOC-MICROCICLO URBANO per SOCo=0.3

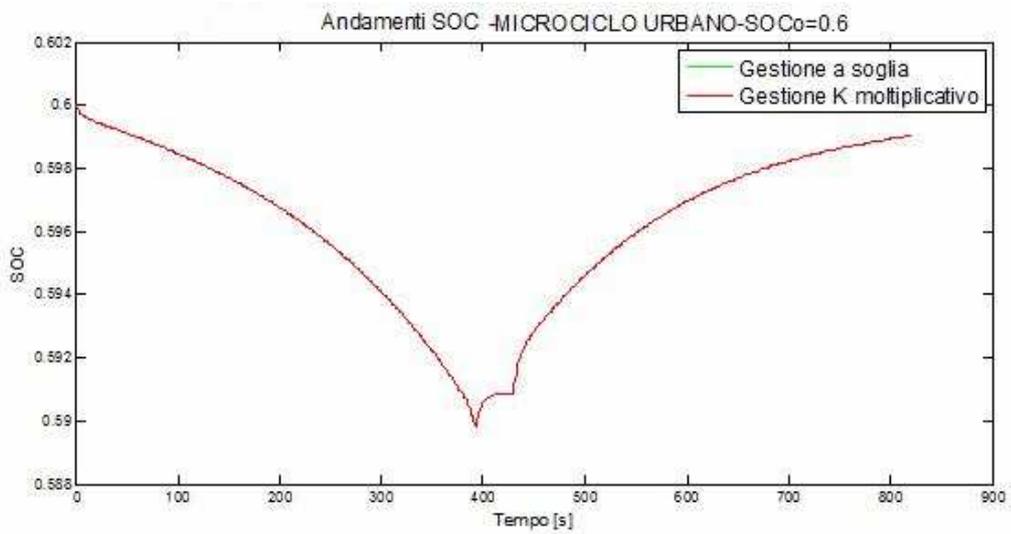


Figura6.22 Andamenti SOC-MICROCICLO URBANO per SOCo=0.6

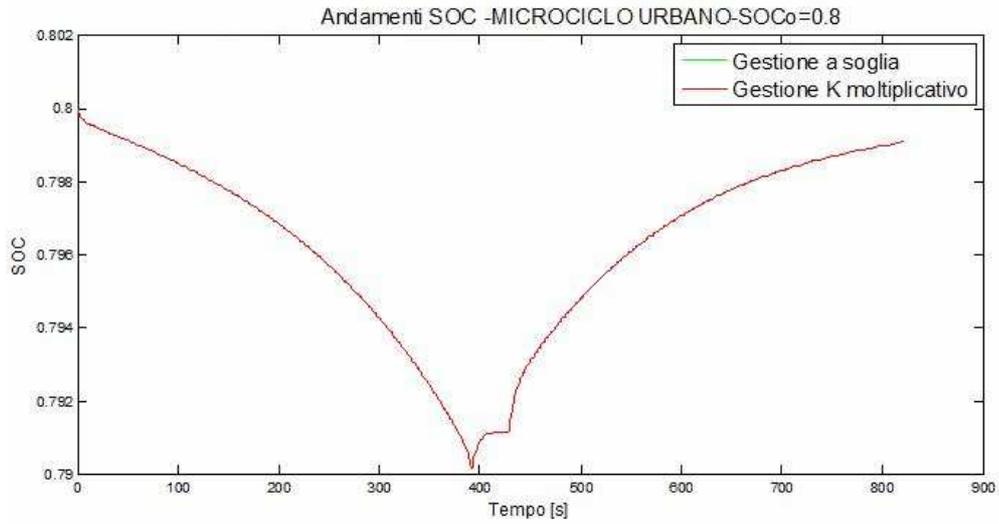


Figura6.23 Andamenti SOC-MICROCICLO URBANO per SOC₀=0.8

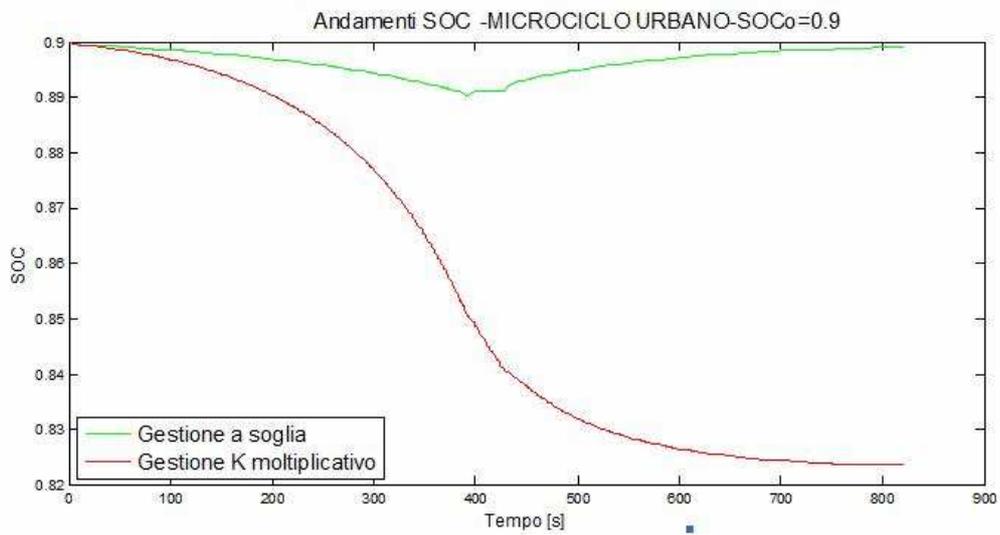


Figura6.24 Andamenti SOC-MICROCICLO URBANO per SOC₀=0.9

Capitolo 7

7.1 Nuovo modello motore elettrico

Nel modello di veicolo utilizzato fino a questo momento, è presente all'interno del blocco azionamento, un modello di motore elettrico che richiede moltissimi parametri di input. Si consideri infatti che il blocco del modello al cui interno è presente il motore, ha collegamenti diretti con il blocco del gestore di bordo, con il chopper a valle e col blocco rappresentante la trasmissione del veicolo. Tutti questi collegamenti risultano essere molto complessi a livello di interconnessione. A riguardo quindi, si è ritenuto opportuno modellarlo nuovamente in un modo più semplice, restringendo il numero di parametri di entrata.

Il primo passo è stato quello di definire una mappatura del rendimento del motore elettrico, definito in matlab-simulink con una look up table, avente come ingresso il vettore della velocità angolare del motore e quello della coppia di riferimento. L'espressione della matrice, che dati questi due vettori in ingresso, calcola la funzione rendimento, è stata costruita in un file editor includendo nel calcolo le varie perdite nel ferro e nel rame. Di seguito le formule matematiche usate:

$$\eta_{nomidmotorelettrico} = \frac{P_u}{P_i}$$

$$P_u = C_m \Omega_m \quad [W]$$

$$P_i = V_n I_n = P_u + P_{perdite} \quad [W]$$

$$P_{perdite} = P_{cu} + P_{fe} + P_m \quad [W]$$

$$P_{cu} = 3R_{avv} I^2 = 3R \left(\frac{C_m}{K_t} \right)^2 = K'_t C^2 \quad [W]$$

$$P_{fe} = K' \Omega_m \quad [W]$$

$$K_t = \frac{C_n}{I_n} \left[\frac{Nm}{A} \right]$$

$$K'_t = \frac{3R_{avv}}{K_t} \left[\frac{\Omega A}{Nm} \right]$$

$$K' = \frac{P_{fe}}{\Omega_m} \left[\frac{(Ws)}{rad} \right]$$

dove:

η_{nom} id mot elettrico = rendimento ideale nominale motore elettrico

P_u = potenza in uscita

P_i = potenza in ingresso

V_n = tensione nominale motore elettrico[V]

I_n = corrente nominale motore elettrico [A]

$P_{perdite}$ = perdite [W]

P_{cu} = perdite nel rame [W]

P_{fe} = perdite nel ferro [W]

P_m = perdite meccaniche [W], trascurabili

R_{avv} = resistenza avvolgimenti [Ω]

K' = costante di coppia perdite ferro [W/ Ω]

K_t = costante di coppia [Nm/A]

K'_t = costante di coppia perdite rame [(A Ω)/(Nm)]

C_n = coppia nominale motore elettrico [Nm]

I_n = corrente nominale motore elettrico [A]

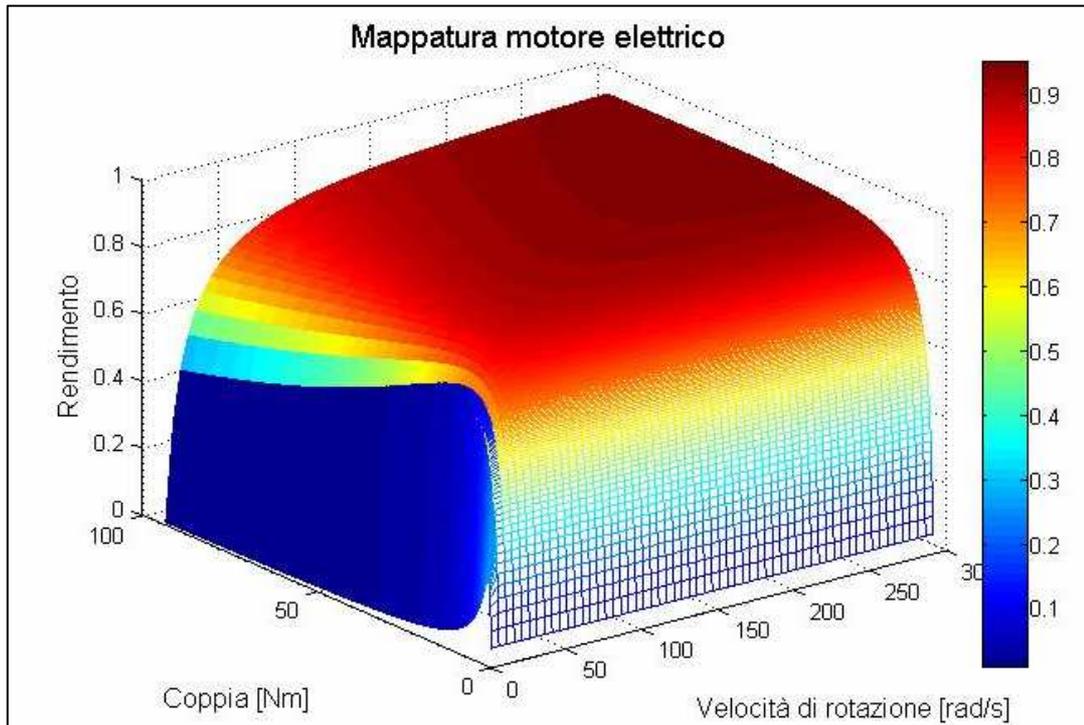


Figura 5: Mappatura del rendimento del motore elettrico

Si riportano i risultati calcolati nella seguente tabella riassuntiva:

η_{nom} id motore elettrico - rendimento ideale nominale motore elettrico	0.93
P_u - potenza in uscita [W]	7032
P_i - potenza in ingresso [W]	7561
P_{perdite} - perdite [W]	529
P_{cu} - perdite nel rame [W]	56
P_{fe} - perdite nel ferro [W]	473
R_{avv} - resistenza avvolgimenti [Ω]	0.058
K' - costante di coppia perdite ferro [W/ Ω]	1.61
K_t - costante di coppia [Nm/A]	1.33
K'_t costante di coppia perdite rame [(A Ω)/(Nm)]	0.1305
C_n - coppia nominale motore elettrico [Nm]	24
I_n - corrente nominale motore elettrico [A]	18

Tabella 7.1: Tabella riassuntiva parametri nuovo modello motore elettrico

Avendo così calcolato la matrice rappresentante il rendimento e costruito il grafico della mappatura del motore in funzione di coppia e velocità di rotazione, è stato implementato il nuovo modello di motore elettrico composto da tre sottomodelli:

- 1) sottomodulo del motore elettrico con all'interno la dinamica del veicolo
- 2) sottomodulo termico
- 3) sottomodulo energetico

Il primo sottomodulo serve per rappresentare il funzionamento del motore elettrico avendo come input la coppia di riferimento e tensione del chopper a valle della FC, calcolate attraverso un loop in cui si confrontano i valori richiesti con quelli istantanei. Il secondo invece serve per calcolare la temperatura e la dissipazione del calore, conosciuta la capacità termica del materiale del motore (preso come riferimento il ferro), il coefficiente globale di scambio e la superficie di scambio del motore. Essendo il motore geometricamente assimilabile ad un cilindro, la dissipazione del calore avviene solo in senso radiale e la superficie alettata per aumentare il raffreddamento, è stata presa due volte quella di scambio. Inoltre, essendo il motore di tipo brushless, le perdite sono solo di tipo statorico.

L'ultimo sottomodulo, è quello che dà in uscita l'andamento dell'energia ed il rendimento del motore elettrico.

7.1.1 Blocco dinamica del veicolo

Nel blocco in questione si è inserita l'espressione del calcolo del momento di inerzia complessivo, data dalla somma dei singoli momenti di inerzia:

$$J = J_t + J_r + J_m = J_t + \frac{J_r}{\tau_p^2} + \frac{J_m}{(\tau_p^2 \tau_c^2)} \text{ [kgm}^2\text{]} \text{ momento d'inerzia totale }^{(1)}$$

dove:

$J_t = 0,03219 \text{ [kgm}^2\text{]}$ momento inerzia trasmissione

$J_r = 0,958 \text{ [kgm}^2\text{]}$ momento inerzia pneumatici

$J_m = 0,958 \text{ [kgm}^2\text{]}$ momento inerzia motore

$\tau_p = 1$ rapporto trasmissione al ponte

$\tau_c = 4$ rapporto trasmissione al cambio

Nella dinamica del veicolo si è considerata solo quella riguardante la marcia in rettilineo, senza perciò quella laterale, dal momento che verrà considerata in futuro. Verrà anche aggiunta la trazione integrale, considerando perciò la distribuzione dei pesi tra anteriore e posteriore ed il numero e layout dei differenziali. Il modello così costruito dunque, già per questo aspetto, è molto semplificato.

- (1) Si ricorda che nella dinamica del veicolo viene considerata la massa apparante traslante, che include perciò tutte le parti in rotazione a bordo veicolo. L'espressione del moto è

$$F_t - F_r = M_{at} \frac{dV}{dt} \text{ con } M_{at} = M + \frac{J_r}{R_e^2} + \frac{J_t}{R_e^2 \tau_p^2} + \frac{J_m}{R_e^2 \tau_p^2 \tau_c^2} \text{ e } \tau_p = \frac{\Omega_m}{\Omega_r} \quad \tau_c = \frac{\Omega_m}{\Omega_t}$$

Dove F_t è la forza di trazione, F_r quella resistente al moto entrambe misurate in [N], M_{at} la massa apparante traslante [kg], V la velocità del veicolo [m/s], J_r , J_t e J_m i momenti di inerzia rispettivamente di pneumatici, trasmissione e motore [kgm²], R_e il raggio di rotolamento [m], τ_p e τ_c il rapporto di trasmissione al ponte ed al cambio, Ω_m , Ω_t e Ω_r la velocità angolare rispettivamente dell'albero motore, dell'albero di trasmissione e della ruota [rad/s].

La forza resistente può inoltre essere descritta come somma di due termini, uno lineare ed uno dipendente dal quadrato della velocità :

$$F_r = A + BV^2 \quad F_r = Mgsen\alpha + fMg \cos \alpha + \frac{1}{2} \rho SC_x V^2 \text{ dove } M \text{ è la massa del veicolo}$$

[kg], α l'angolo di pendenza della strada [rad] anche se normalmente espressa in percentuale

$$\frac{i}{100} = tg\alpha, \quad f \text{ coefficiente di rotolamento, } \rho \text{ densità dell'aria, } S \text{ sezione frontale del veicolo [m}^2\text{],}$$

C_x coefficiente di penetrazione aerodinamica.

7.1.2 Blocco termico

Nel blocco in questione invece, è stata inserita l'equazione che esprime la potenza dissipata sotto forma di calore:

$$P_{dissipata} = C_a \frac{d(\Delta\vartheta)}{dt} + KS\Delta\vartheta \text{ [W] Potenza termica dissipata}$$

dove:

$C_a = m \cdot c_{pfe}$ [J/°K] Capacità termica

$S = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot (r_e - r_i)$ [m] Superficie cambio calore

$\Delta\theta = T_{motore} - T_{ambiente}$ [°K]

$r_e = 0,125$ [m] Raggio statore

$r_i = 0,0625$ [m] Raggio rotore

$L = 0,43$ [m] lunghezza del motore

$$K = \begin{cases} 10 \div 100 \text{ [W/(m}^2\text{°K)] coefficiente globale di scambio aria} \\ 500 \div 1000 \text{ [W/(m}^2\text{°K)] coefficiente globale di scambio acqua} \end{cases}$$

$c_{pfe} = 447$ [J/(kg°K)] calore specifico ferro

$t_c = 4$ rapporto trasmissione al cambio

$t_p = 1$ rapporto trasmissione al ponte

$B = 0,013$ coefficiente di rotolamento

Per il calcolo sono state fatte inoltre le seguenti considerazioni:

- $r_e = 2 r_i$
- superficie disperdente il calore come solo l'area laterale, calcolata come differenza tra la superficie laterale del cilindro esterno "pieno" rappresentante la geometria statorica e quella "vuota" interna rappresentante la geometria rotorica.
- materiale di costruzione: ferro
- superficie alettata di dispersione del calore come il doppio di quella propria del motore (S)

Si ricorda inoltre, che i motori brushless, hanno solamente perdite di tipo statorico.

All'interno del blocco perciò, si ritrova l'integrazione di tale espressione, che dà in uscita il gradiente termico, relativo alla temperatura ambiente imposta.

Cambiando inoltre, nel file editor di comando del modello, il valore del coefficiente globale di scambio termico K, si possono considerare le due condizioni di raffreddamento ad aria o ad acqua. Di seguito si riporta un esempio di andamento del transitorio del $\Delta\theta$, nel caso di raffreddamento ad acqua.

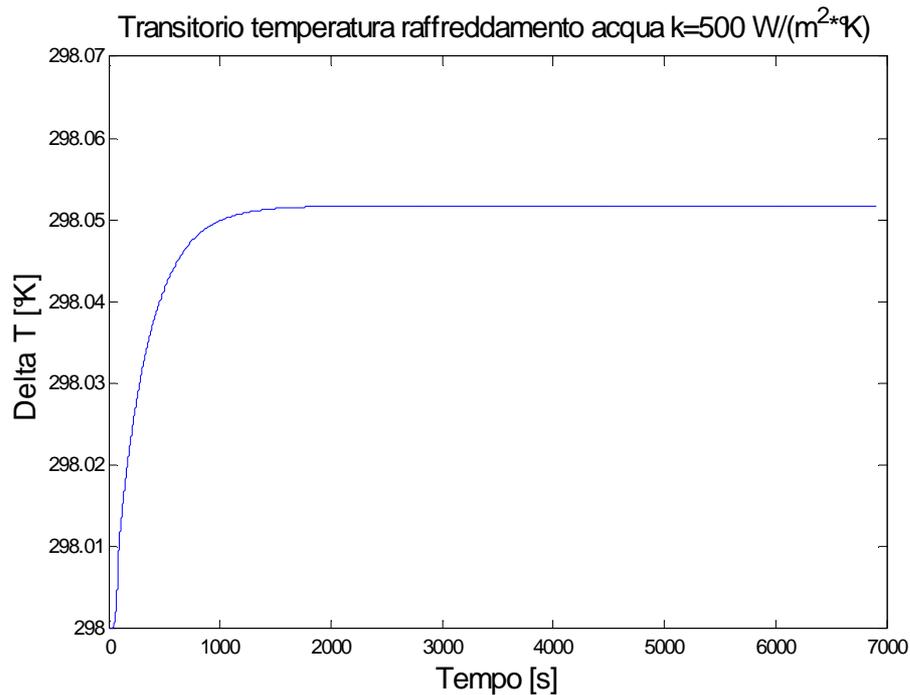


Figura 7.2: Andamento del transitorio del $\Delta\theta$ di temperatura del motore elettrico, con raffreddamento ad acqua.

7.1.3 Blocco energia e rendimento

Il terzo blocco ha al suo interno invece, l'integrazione della potenza in egresso, che dà come output, l'energia utilizzata dal motore. C'è anche la possibilità di avere il rendimento, sempre come output, anche se la mappatura viene calcolata inizialmente, durante il lancio del file editor di comando.

7.2 Validazione del modello

Il modello così ottenuto è stato inserito nel modello integrale, anche se in maniera parziale: il modello originale infatti, presentando al suo interno moltissime variabili rispetto alle poche inserite in quest'ultimo modello, non è capace di funzionare soltanto con queste ultime modifiche, ma deve essere ulteriormente e dettagliatamente semplificato. Per avere quindi una conferma della sua correttezza, lo si è fatto funzionare non collegato direttamente al modello originale, ma facendo una simulazione imponendo come input i due vettori contenenti i dati necessari, importati da una simulazione effettuata precedentemente col modello originale. Si riporta ad esempio, uno degli andamenti del transitorio di temperatura calcolati.

Così facendo, si è imposto quindi il funzionamento del modello come se fosse collegato a tutto il modello complessivo. I vettori di input sono stati la tensione calcolata in loop tra motore elettrico e chopper a monte di comando, e la coppia di riferimento proveniente dal blocco del gestore di bordo rappresentante il pilota.

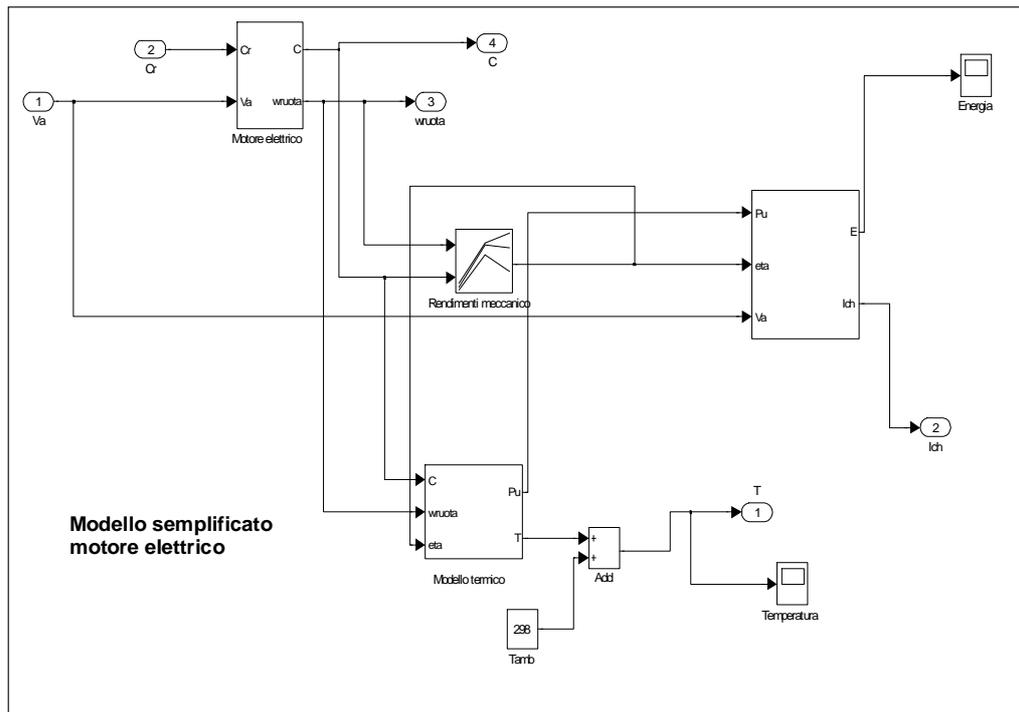


Figura 7.3: Nuovo modello motore elettrico

Capitolo 8

8.1 Confronto tra due diversi modelli di stack

Nell'ultima versione di Matlab 7.6.0 (R2008a), sono presenti diversi modelli già implementati di stack, tre di tipo PEM ed una di tipo AFC, partendo da una taglia minima di 1.26kW fino ad un massimo di 50kW. I modelli possono funzionare in due modi: o con la configurazione in cui gli input sono già inseriti direttamente dal programma, oppure inserendo gli input di funzionamento dall'esterno. A sua volta quest'ultima opzione ha al suo interno, sia la possibilità di scegliere tra un modello semplificato, che richiede perciò pochi parametri di ingresso, che un modello più dettagliato, se si hanno a disposizione diversi parametri di funzionamento. Il modello presente all'interno del modello originale del Porter-Piaggio poteva così essere sostituito da questo pre-esistente, ma non è stato utilizzato, dal momento che il suo rendimento reso come output, probabilmente è calcolato senza considerare la differenza tra la quantità di idrogeno in ingresso ed in uscita.

Riguardo a questo aspetto infatti, è stata fatta un'analisi del modello: al suo interno, i blocchi dedicati al calcolo del rendimento di cella fanno infatti riferimento ad una grandezza denominata "tasso di utilizzazione di idrogeno" U_{fh_2} , che è calcolata in base alla portata di idrogeno in entrata. Il problema è che non facendo riferimento alla quantità di idrogeno in uscita, il valore così calcolato del rendimento di cella, risulta falsato. Dall'utilizzo dell'help infatti, dove vengono riportati alcuni grafici esemplificativi del modello, vi è anche quello relativo al rendimento: tale andamento, all'aumento della quantità di idrogeno in entrata, subisce una strana e non attesa diminuzione. Per questo motivo, si è continuato ad utilizzare il modello originale, anche se questo è un aspetto da valutare ulteriormente e non esclude un suo utilizzo futuro.

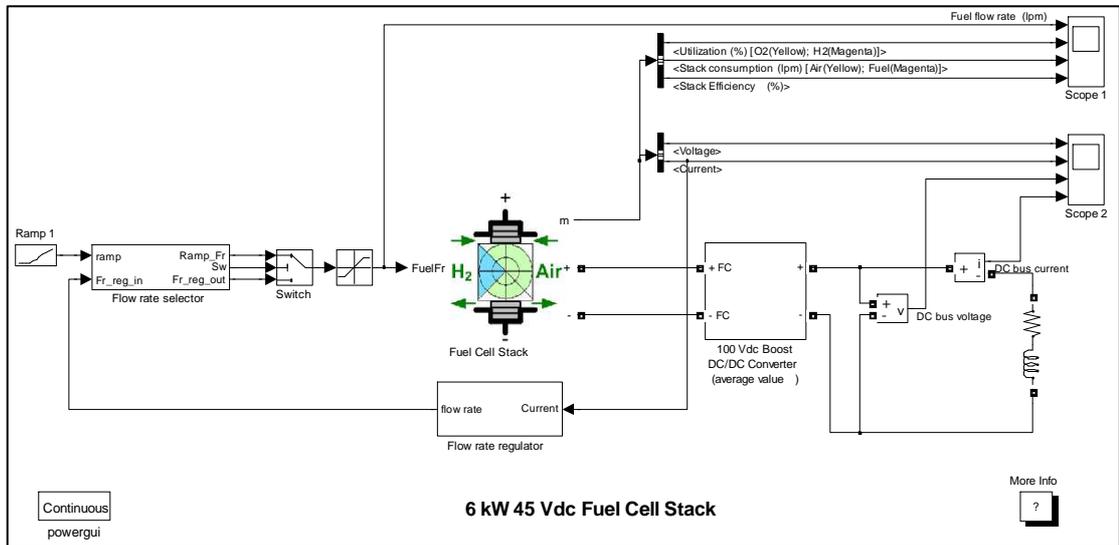


Figura 8.1: Modello di stack di default Matlab 7.6.0 (R2008a)

Appendice

A.1 Parametri del veicolo

Parametro	Valore	Variabile nel workspace
<i>Masses [frame, transmission, front wheel, rear wheel]</i>	[653 kg; 33.6 kg; 27.2 kg; 27.2 kg]	M(1:4)
<i>Moment of inertia [transmission, motor, front and rear wheels]</i>	[0.03219 kgm ² ; 0.958 kgm ² ; 0.958 kgm ²]	M(5:7)
<i>Transmission ratio motor/rear wheels</i>	[4]	M(8)
<i>Coefficients of transmission damping torque [torque coeff., speed coeff.]</i>	[0.02; 0 Nm/rad·s]	M(9:10)
<i>Vehicle damping factors: [aerodynamic damping, rolling damping]</i>	[0.916 m ² ; 0.013]	M(11:12)
<i>Front and rear wheel radiuses</i>	[0.2654 m; 0.2654 m]	M(13:14)
<i>Idle stroke fraction of rear brake leverage</i>	[0.3]	M(15)
<i>Front and rear brake nominal torques</i>	[1525 Nm; 1525 Nm]	M(16:17)
<i>Front and rear brake temperature coefficients</i>	[0 1/K; 0 1/K]	M(18:19)
<i>Front and rear brake nominal temperatures</i>	[313.15 K; 313.15 K]	M(20:21)
<i>Front and rear brake thermal capacitance</i>	[100 J/K; 100 J/K]	M(22:23)
<i>Parameters of front brake thermal conductance</i>	[10 W/K; 0.33 W/K/rad·s]	M(24:25)
<i>Parameters of rear brake thermal conductance</i>	[10 W/K; 0.33 W/K/rad·s]	M(26:27)
<i>Total mass of all devices on board installed</i>	[200 kg]	M(28)
<i>Initial values [vehicle speed, front brake temperature, rear brake temperature]</i>	[0 m/s; 298.15 K; 298.15 K]	Mo
<i>Gravity acceleration</i>	[9.806 m/s ²]	U(1)
<i>Air density</i>	[1.2 kg/m ³]	U(2)
<i>Longitudinal wind speed</i>	[0 m/s]	U(3)
<i>Carried masses [driver, load]</i>	[80 kg; 120 kg]	U(4:5)

A.2 Parametri dell'azionamento

A.2.1 Motore elettrico

Parametro	Valore	Variabile nel workspace
Max motor line to voltage	[380 V]	A(1)
Motor speed [nominal, max]	[293 rad/s; 293 rad/s]	A(16:17)
Motor line currents [continuous current, continuous stall current, peak current, demagnetizing current]	[18 A; 25 A; 76 A; 76 A]	A(2:5)
Motor torques [continuous torques, continuous stall torque, peak torque]	[24 Nm; 43 Nm; 93 Nm]	A(18:20)
Motor rotor structure	Internal Magnets	A(15)
Number of pole couples	3	A(6)
Line to line resistance [nominal value, temperature coefficient at nominal temperature]	[0.058 Ω ; 0.00321 1/K]	A(10,12)
Inductance [phase leakage inductance, max line to line inductance, min line to line inductance]	[0 H; 3.2e-3 H; 3.2e-3 H]	A(7:9)
Motor speeds [nominal speed, max speed]	[293 rad/s; 293 rad/s]	A(16:17)
Friction torques [static friction torque, viscous friction torque]	[0.75 Nm; 0.03 Nm]	A(21:22)
Rotor inertia	[0.00840 kgm ²]	A(27)

A.2.2 Convertitori

Parametro	Valore	Variabile nel workspace
Max current of converters [inverter output current, chopper input current]	[85 A; 510 A]	A(28:29)
Idle powers of converters [inverter, chopper]	[15 W; 15 W]	A(30:31)
Converters components base voltages [inverter valve, inverter diode, chopper valve, chopper diode]	[0.07 V; 0.3 V; 0.07 V; 0.3 V]	A(36:39)
Converters components differential resistance [inverter valve, inverter diode, chopper valve, chopper diode]	[0.5e-6 s; 20000 Hz; 0.5e-6 s; 20000 Hz]	A(44:47)
Converters components commutation parameters [inverter commutations duration, inverter commutations frequency, chopper commutations duration, chopper commutations frequency]	[0.0666 Ω ; 0.0333 Ω ; 0.018 Ω ; 0.009 Ω]	A(52:55)
Thermal capacitances [chopper-inverter capacitance, motor capacitance]	[5400 J/K; 30000 J/K]	A(56:57)
Thermal conductances [chopper-inverter capacitance, motor capacitance]	[45 W/K; 50 W/K]	A(58:59)
Nominal temperatures [chopper-inverter motor]	[373 K; 423 K;]	A(60:61)
Initial values [converters temperature, motor speed, motor temperature]	[298.15 K; 0 rad/s; 298.15 K]	A ₀

A.3 Ausiliari del veicolo

Parametro	Valore	Variabile nel workspace
<i>Auxiliary nominal voltage</i>	[12 V]	S(1)
<i>Lights nominal power [parking,lights,headlights]</i>	[30 W; 230 W]	S(2:3)
<i>Stops lights nominal power</i>	[42 W]	S(4)
<i>Indicators nominal power</i>	[42 W]	S(5)
<i>Indicators repetition period</i>	[1.5 s]	S(6)
<i>Auxiliary chopper idle power</i>	[3.44 W]	S(7)
<i>Chopper components base voltage [valve,diode]</i>	[0.2 V;0.5 V]	S(8:9)
<i>Chopper components differential resistances [valve,diode]</i>	[8e-6 Ω ; 2e-6 Ω]	S(10:11)
<i>Chopper commutation duration</i>	[1e-6s]	S(12)
<i>Chopper commutation frequency</i>	[5000 Hz]	S(13)
<i>Chopper thermal capacitance</i>	[100 J/K]	S(14)
<i>Chopper thermal cconductance</i>	[2 W/K]	S(15)
<i>Chopper initial temperture</i>	[293.15 K]	So

A.4 Parametri dello stack e degli ausiliari di stack

A.4.1 Modello di cella

$$E_o = \left\{ E_{ref} \left[1 - \alpha_e (T - T_{ref}) \right] + \frac{RT}{2F} \ln(p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}) \right\} V$$

$$R_o = \left\{ R_{ref} \left[1 - \alpha_R (T - T_{ref}) \right] \right\} \Omega$$

$C = \text{costante}$

$$R_1 = \left\{ \frac{V_c + V_0}{j_{lim} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{V_c}{V_1} \right)^2 \right] \right\} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{V_c}{V_2} \right)^2 \right] \right\}} \right\} \Omega$$

$$V_1 = \left[V_{1ref} \left(1 + \frac{n - n_{ref}}{n^*} \right) \left(1 + \frac{p - p_{ref}}{p^*} \right) \exp \left(\frac{T^*}{T} - \frac{T^*}{T_{ref}} \right) \right] V$$

$$j_{lim} = j_{ref} \frac{1 + \frac{T - T_{ref}}{T^0}}{\alpha_0 + \frac{\alpha_1 p_{sat}}{(p - p_{sat})}} \left[1 + \alpha_2 + \alpha_2 \exp \left(- \frac{n - n_{ref}}{n^0} \right) \right]$$

dove:

$V_0, V_2, V_{1ref}, n_{ref}, n^*, p_{ref}, T_{ref}, T^*, j_{ref}, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, n^0, T^0$ sono costanti numeriche

n = flusso molare di O₂

p = pressione assoluta dell'aria

T = temperatura assoluta di cella

A.4.2 Dimensionamento sistema di generazione a celle a idrogeno

Stack

Parametro	Valore	Variabile nel workspace
<i>Nominal voltage,current and temperature</i>	[60.5 V; 160 A; 343 K]	FC(1:3)
<i>Icc current</i>	458A	FC(12)
<i>Nominal values of reactans [air and hydrogen pressure,air flow,hydrogen flow]</i>	[1 bar; 1 bar; 11.44g/s; 0.33 g/s]	FC(4:7)
<i>Number of cells</i>	93	FC(8)
<i>Active cell area</i>	[228]	FC(9)
<i>Stack thermal capacitance,stack cooling ducts thermal resistance</i>	[1.0858e+5 J/K; 9.9280e-5 K/W]	FC(10:11)
<i>Cathode pneumatic parameters [resistance,pneumatic input capacitance,pneumatic cell capacitance]</i>	[3.6e-3(bar s)/g; 0.74 g/bar; 1.32 g/bar]	FC(13:15)
<i>Anode pneumatic parameters [resistance,pneumatic input capacitance,pneumatic cell capacitance]</i>	[35.7e-2(bar s)/g; 0.05 g/bar; 0.1 g/bar]	FC(16:18)
<i>Initial temperature [stack temperature,air pressure,hydrogen pressure]</i>	[298 K; 1 bar; 1.05 bar]	FCo(1:3)

Alimentazione H2

Parametro	Valore	Variabile nel workspace
<i>Tank inner volume</i>	[55000 cm ³]	AH(1)
<i>Tank internal temperature</i>	[313 K]	AH(2)
<i>Nominal output pressare of tank reducer</i>	[10 bar]	AH(3)
<i>Nominal output pressure of proportional regulator</i>	[4 bar]	AH(4)
<i>Nominal flow of proportional regulator</i>	[1.0 g/s]	AH(5)
<i>Pneumatic resistance of proportional regulator</i>	[0.09 (bar s)/g]	AH(6)
<i>Ejector characteristic sections [nozze restricted section,aspiration section,diffuser restricted section]</i>	[3.02 mm ² ; 402.9mm ² ;101mm ²]	AH(7:9)
<i>Ejector inlet temperatures</i>	[298 K; 323 K]	AH(10:11)
<i>Nominal output pressure of pressure reducer</i>	[0.3 bar]	AH(12)
<i>Nominal flow of pressure reducer</i>	[1.0 g/s]	AH(13)
<i>Pneumatic resistance of pressare reducer</i>	[0.09 (bar s)/g]	AH(14)
<i>Initial pressare [tank; proportional regulator output; pressare reducer output]</i>	[350 bar; 1.05 bar;1 bar]	AHo

Alimentazione aria

<i>Parametri</i>	<i>Valori</i>	<i>Variabile nel workspace</i>
<i>Blower motor nominal values:voltage,power,speed,current,no load current</i>	[12 V; 1.1120e+3 W;524 rad/s; 118.6 A; 11.86A]	AA(1:5)
<i>Moment of inertia of motor+blower</i>	[1e-4 kgm ²]	AA(6)
<i>Blower initial speed</i>	[0 rad/s]	AAo
<i>Blower nominal values,maximum flow,output-input pressure gap,power,speed</i>	[5.9307e+4 cm ³ /s; 0.6 bar; 1.1120e+3 W; 524 rad/s]	AA(7:10)
<i>Blower inlet air temperature</i>	[298 K]	AA(11)
<i>Air humidity</i>	10%	AA(12)
<i>Air filter pneumatic resistance</i>	2.5e-3(bar s)/g	AA(13)

Sistema di raffreddamento

<i>Parametri</i>	<i>Valori</i>	<i>Variabile nel workspace</i>
<i>Nominal voltage,power,current,no-load current of pump motor</i>	[12 V; 96.7 W; 524 rad/s; 10.05 A; 1.0 A]	SR(1:5)
<i>Moment of inertia of the group motor-pump</i>	[1e-4 kgm ²]	SR(6)
<i>Pump nominal values [flow,output-input pressure gap,power,speed]</i>	[483.5 cm ³ /s; 1 bar; 96.7 W; 524 rad/s]	SR(7:10)
<i>Cooling fluid density</i>	[1 g/cm ³]	SR(11)
<i>Radiator nominal flow</i>	[483.5 g/s]	SR(12)
<i>Cooling fluid specific thermal capacitance</i>	[4.186 J(g K)]	SR(13)
<i>Expansion chamber fluid mass</i>	[100 g]	SR(14)
<i>Radiator thermal resistance</i>	[6.2050e-4 (s K)/J]	SR(15)
<i>Fan nominal power</i>	[120.87 W]	SR(22)
<i>Fan nominal flow</i>	[2014500 cm ³ /s]	SR(16)
<i>Fan switch on and switch off temperature</i>	[363 K; 333 K]	SR(17:18)
<i>Ambient temperature</i>	[298 K]	SR(19)
<i>Hydraulic resistance of the cooling circuit</i>	[8.4388e-4 (bar s)/g]	SR(20)
<i>Hydraulic inductance of the cooling circuit</i>	[15e-6 (bar s ²)/g]	SR(21)
<i>Initial values [pump speed,cooling fluid temperature;cooling fluid flow]</i>	[0 rad/s; 313 K; 0 g/s]	SRo

Fuel-Cell converter

<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>	<i>Variabile nel workspace</i>
<i>Nominal output power</i>	[12523 W]	CP(1)
<i>Converter efficiency</i>	[0.95]	CP(2)
<i>Max output current</i>	[408 A]	CP(3)
<i>Thermal capacitance</i>	[685 J/K]	CP(4)
<i>Thermal resistance</i>	[0.06 K/W]	CP(5)
<i>Initial temperature</i>	[298 K]	CPo

A.5 Parametri dell'accumulo

A.5.1 Modello di cella

Si riportano in dettaglio le espressioni polinomiali che approssimano gli andamenti della E_o , R_o , R_1 e C , in funzione del SOC, unitamente ad alcune tabelle significative.

$$E_o = (0.3102SOC^3 - 0.5333SOC^2 + 0.9002SOC + 3.4374)V$$

$$R_o = (0.0009SOC^2 - 0.0019SOC + 0.005)\Omega$$

$$R_1 = (0.0892SOC^3 + 0.1663SOC^2 - 0.0944SOC + 0.0199)\Omega$$

$$\tau = 90s$$

$$C = (154743SOC^3 - 276627SOC^2 + 152313SOC - 3169.4)F$$

SOC_o	$E_o [V]$	Approssimazione cubica [V]	Errore assoluto [V]
1,00	4,1167	4,1145	-0,0022
0,91	4,0388	4,0452	0,0064
0,81	3,9810	3,9815	0,0005
0,72	3,9263	3,9218	-0,0045
0,62	3,8783	3,8645	-0,0138
0,53	3,7994	3,8079	0,0085
0,43	3,7375	3,7505	0,0130
0,34	3,6916	3,6908	-0,0008
0,24	3,6297	3,6270	-0,0027
0,15	3,5693	3,5577	-0,0116
0,05	3,4739	3,4811	0,0072

SOC_o	$R_o [\Omega]$	$R_o+R_1 [\Omega]$	$R_1 [\Omega]$	$\tau [s]$	$C [F]$
1,00	0,0040	0,0074	0,0034	90	26698
0,91	0,0040	0,0076	0,0036	90	25091
0,81	0,0041	0,0085	0,0044	90	20482
0,72	0,0041	0,0096	0,0056	90	16138
0,62	0,0042	0,0079	0,0037	90	24083
0,53	0,0043	0,0078	0,0035	90	25583
0,43	0,0043	0,0084	0,0041	90	22048
0,34	0,0045	0,0083	0,0038	90	23647
0,24	0,0046	0,0091	0,0045	90	20076
0,15	0,0048	0,0135	0,0087	90	10345
0,05	0,0049	0,0213	0,0164	90	5491

A.5.2 Dimensionamento batteria

Si riportano i parametri caratteristici della batteria

Parametro	Valore	Variabile nel workspace
<i>Nominal voltage</i>	[72 V]	MH(1)
<i>Nominal capacitance</i>	[20 Ah]	MH(2)
<i>Voltage max;voltage min</i>	[84 V; 60 V]	MH(3:4)
<i>Rn</i>	[20.97]	MH(5)
<i>Cm</i>	[0.047]	MH(6)
<i>Thermal conductance</i>	[11 W/K]	MH(8)
<i>Thermal capacitance</i>	[813.3 J/K]	MH(9)
<i>Initial SOC,temperature</i>	[0.3; 313.15 K]	MHo

A.6 Parametri controllo dello stack e del flusso di potenza

Parametro	Valore	Variabile nel workspace
<i>O₂ stoichiometric ratio</i>	2	UC(1)
<i>Minimum stack current</i>	[16 A]	UC (2)
<i>Minimum cooling fluid mass flow</i>	[48.35 g/s]	UC (3)
<i>Max output power of fuel cell converter</i>	[12523 W]	CP(1)
<i>Max output current of fuel cell converter</i>	[408 A]	CP(3)
<i>Max current of fuel cell stack</i>	[240 A]	UC (4)
<i>State of charge high level of supercaps: SOC_h-gestione filtro di potenza</i>	0.75	UC (5)
<i>State of charge low level of supercaps: SOC_l- gestione filtro di potenza</i>	0.15	UC (6)
<i>State of charge high level of supercaps: SOC_h-gestione K moltiplicativo</i>	0.97	UC (5)
<i>State of charge low level of supercaps: SOC_l- gestione K moltiplicativo</i>	0.1	UC (6)
<i>Filter time constant of ECE controller: τ</i>	[7 s]	UC (7)

A.7 Parametri del nuovo modello di motore elettrico

Parametro	Valore	Variabile nel workspace
<i>Ca, capacità termica motore</i>	[24585 J/°K]	B(1)=
<i>L, lunghezza statore</i>	[0.43 m]	B(2)=
<i>m, massa motore elettrico</i>	[55 kg]	B(3)=
<i>cp, calore specifico ferro</i>	[447 J/(kg°K)]	B(4)=
<i>re, raggio statore</i>	[0.125 m]	B(5)=
<i>ri, raggio rotore=0.5re</i>	[0.0625 m]	B(6)=
<i>k,coefficiente globale scambio calore aria:10÷100 [W/(m^2*°K)] acqua:500÷10.000 [W/(m^2*°K)]</i>	[100 W/(m^2*°K)]	B(7)=
<i>S,superficie disperdente calore=2*pi*(re-ri)*L</i>	[0.1689 m^2]	B(8)=
<i>momento inerzia totale(pneumatici+trasmissione+motore)</i>	[2.1874 kg*m^2]	B(9)
<i>momento inerzia pneumatici</i>	[0.958 kg*m^2]	B(10)
<i>momento inerzia trasmissione</i>	[0.03219 kg*m^2]	B(11)
<i>momento inerzia motore</i>	[0.958 kg*m^2]	B(12)
<i>coefficiente di rotolamento</i>	[0.013]	B(13)
<i>massa totale veicolo</i>	[1176 kg]	B(14)
<i>rapporto trasmissione al ponte</i>	[1]	B(15)
<i>rapporto trasmissione al cambio</i>	[4]	B(16)

Bibliografia

Testi consultati:

1. Cavallo, Setola R., Vasca F., La nuova guida Matlab, Liguori Editore, 2002
2. Ceraolo M., Dispense del Corso di Sistemi Elettrici di bordo
3. Sani L., Dispense del corso introduttivo a Matlab e Simulink
4. Lutzemberger G., Sistema di Propulsione elettrica a celle a combustibile per piccolo veicolo ad uso prevalentemente cittadino, Pisa, Università degli Studi, 2007 (tesi)
5. Menga P., Ceraolo M., An evaluation of global environmental and energy value of vehicle technologies
6. European Commission-Community Research, Hydrogen and Fuel Cells-A Handbook for Communities, October 2007
7. EPER-European Community, Summary of the first EPER review report
8. Dipartimento dei Sistemi Elettrici e Automazione, PEFC-SC fed scooter dynamical model, Manuale dell'utente
9. GBP Battery Co.,LTD, Technical Datasheet lithium-ion rechargeable power battery
10. Paganelli G., Ercole G., Brahma A., Guezennec Y., Tizzoni G., General supervisory control policy for the energy optimization of charge-sustaining hybrid electric vehicles, JSAE Review 22 (2001) 511-518,9 April 2001
11. Bosteels D., May J., Karlsson H., de Serves C., Regulated and non regulated emissions from modern european passenger cars, SAE 2006,1516-01-2006
12. Piaggio, Specifiche di prodotto del Porter Elettrico
13. Larminie J., Dicks A., Fuel Cell Systems Explained, Wiley, 2003
14. Dinamica del veicolo, Cittàstudi Edizioni, 1998

Siti consultati:

15. <http://www.allguida.it/tag/auto-idrogeno/page/2/>
16. <http://eper.ec.europa.eu/eper/>
17. <http://www.micro-vett.it/H2/ita/H2.html>
18. http://www.enitecnologie.it/pdf_comuni/tpoint/articoli/produzione%20energia_elettrica/2005/prossimafermata_1_2005.pdf
19. http://xteam.fondazionepolitecnico.it/index.php?option=com_content&task=view&id=153&Itemid=76
20. <http://www.sae.org/automag/features/fuelcells/fuelcell3.htm>

Ringraziamenti

...Alla mia grandissima famiglia, per aver creduto in me durante tutti questi anni di studio e
non solo...

...Ai tutti i miei nonni, colonne granitiche della mia vita...

...A tutti i miei amici, che non elenco perchè chi sa di esserlo, avrà un brivido lungo la
schiena nel leggere, senza i quali la mia esistenza avrebbe meno allegria e senso...

...A me stessa...

...A tutte quelle persone che ho incontrato per un breve ma importante periodo della mia
vita, che mi hanno insegnato e fatto capire alcune cose, altrimenti rimaste incognite...

...A tutte quelle persone che incontrerò, che mi troveranno migliore di oggi, anche grazie a
questo importantissimo e ambitissimo traguardo...

...A tutte quelle persone che non hanno avuto fiducia in me, con la riprova che si
sbagliavano...

...Non sarà una laurea a rendermi una persona migliore, ma è un passo avanti...

Grazie a tutti!