

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Meccanica



Studio di un sistema di accumulo integrato
batteria ioni di litio – supercapacità per un sistema ibrido bimodale

Relatore: Ch.mo Prof. Ferdinando Luigi MAPELLI

Co-relatore: Dott. Ing. Davide TARSITANO

Tesi di Laurea di:

Mattia COMPAGNONI Matr. 707983

Anno Accademico 2009 - 2010

Indice Generale

Introduzione	01
Struttura della Tesi	04
Capitolo 1 : Stato dell'arte	07
1.1 Introduzione	07
1.2 Dal veicolo tradizionale al veicolo ibrido	09
1.3 Stato dell'arte dei veicoli ibridi	14
1.4 Veicoli Bimodali	18
1.5 Esempi commerciali	18
Capitolo 2 : I supercondensatori	23
2.1 Introduzione sui sistemi di accumulo	23
2.2 Aspetti generali dei supercondensatori	27
2.3 Cenni storici	28
2.4 Struttura interna	32
2.5 Principio di funzionamento	37
2.6 Capacitori a doppio strato	40
2.7 Modello matematico	43
2.8 Efficienza di funzionamento	47
2.9 Calcolo dello stato di carica - (SOE)	49
2.10 Schema a blocchi	51
2.11 Applicazioni di moduli di supercondensatori	53

2.12	Studio del collegamento in parallelo batteria elettrochimica – supercondensatore	61
------	--	----

Capitolo 3 : Sistema di accumulo integrato

	batteria al litio - supercapacità	69
3.1	Trofeo Aria Nuova	69
3.2	Calcolo dei consumi energetici equivalenti	78
3.3	Prototipo Bimodale	80
3.4	Dimensionamento dei supercondensatori in serie e parallelo	83
3.5	Calcolo dei pesi e degli ingombri	88

Capitolo 4 : Strategia di controllo del sistema di accumulo ed implementazione

	nel simulatore numerico	91
4.1	Introduzione	91
4.2	Il simulatore numerico	94
4.2.1	Ciclo	94
4.2.2	Pilota	94
4.2.3	Azionamento elettrico	96
4.2.4	Motore endotermico	103
4.2.5	Trasmissione meccanica	105
4.2.6	Frizione	106
4.2.7	Veicolo	108
4.2.8	Servizi Ausiliari	109
4.2.9	Serbatoio	110
4.2.10	Modello Termico	110

4.3	Modellazione sistema di accumulo energetico innovativo batteria – supercapacità	111
4.4	Strategia di gestione dell’energia di bordo	120
4.5	Verifica funzionamento modello supercapacitori	136
4.6	Validazione simulatore completo	139
Capitolo 5 : Risultati numerici		153
5.1	Simulazione strategie di controllo	153
5.2	Risultati : batteria ioni di litio – supercapacità	156
5.3	Risultati : batterie litio – polimeri – supercapacità	170
5.4	Risultati giro singolo ripetuto	174
5.5	Valutazioni sui consumi di combustibile	177
Conclusione		179
Appendice A		183
Bibliografia		191

Elenco delle Figure

1.1	Percentuale Veicoli Ibridi	07
1.1	Previsione del parco di veicoli circolante	08
1.2	Cicli cinematici standard (EPA)	09
1.3	Curve di consumo a velocità costante	10
1.4	Int. della potenza eff. e media per il ciclo NYCC	12
1.5	Dal veicolo tradiz. al veicolo ibrido	13
1.6	Schema veicolo ibrido elettrico serie	15
1.7	Schema veicolo ibrido elettrico parallelo	16
1.8	Schema realizzativo : Toyota Prius	19
1.9	Schema realizzativo : Honda Insight	20
1.10	Schema realizzativo : Toyota Estima	20
2.1	Classificazione dei sistemi di accumulo	23
2.2	Piano di Ragone	25
2.3	Double layer capacitors	27
2.4	Condensatore brevettato dalla General Electric	29
2.5	Ultracapacitor , Maxwell Technologies	31
2.6	Struttura interna di un condensatore elettrochimico	32
2.7	Classificazione elettroliti sul Piano di Ragone	36
2.8	Accumulo di carica nella distr. a doppio strato	37
2.9	Dipendenza della capacità dalla frequenza	39
2.10	Capacitore elettrico a doppio strato	40
2.11	Energia interna di un supercondensatore	41
2.12	Circuito elettrico eq per un condensatore elettrochim.	43
2.13	Circuito elettrico equivalente	44
2.14	Caratteristica di scarica	46
2.15	Efficienza percentuale nel ciclo di scarica	48
2.16	Diagramma SOE	50
2.17	Schema a blocchi Ultracapacitore	51

2.18	Diagramma di Bode	52
2.19	Frenatura con recupero di convogli metropolitani	53
2.20	Livellamento dei carichi in veicoli ibridi	54
2.21	Ricarica di mezzi di trasporto su strada	55
2.22	Recupero di energia in impianti di sollevamento	56
2.23	Apparecchiature di diagnostica ospedaliera	57
2.24	I supercondensatori nella generazione distribuita	58
2.25	Compensazione della c.d.t. in sistemi elettrici deboli	59
2.26	Miglioramento qualità fornitura energia elettrica	60
2.27	Alta richiesta di Potenza	62
2.28	Bassa richiesta di Potenza	62
2.29	Frenata rigenerativa	63
2.30	Collegamento parallelo diretto	63
2.31	Andamenti di Corrente e Tensione	64
2.32	Schema elettrico Ucap – Conv DC/DC – Batterie	65
3.1	Locandina Trofeo Aria Nuova	69
3.2	Tracciato Circuito Monza	71
3.3	Velocità Massima raggiunta sul giro	72
3.4	Utilizzo Energia in Batteria	74
3.5	Utilizzo Energetico in Batteria (Sperimentale)	75
3.6	Consumo di Combustibile	76
3.7	Prototipo Bimodale (Fiat Grande Punto 1.2)	80
3.8	Impianto di trazione elettrica	81
3.9	Modulo di Batteria Ioni di litio (ThunderSky)	82
3.10	Schema elettrico equivalente	84
3.11	Esempio di collegamento in serie	85
3.12	Circuito elettrico equivalente	87
3.13	Pacco di Supercondensatori	89
4.1	Simulatore numerico	91
4.2	Macroblocchi principali	92
4.3	Circuito equivalente	97

4.4	Caratteristica EM	98
4.5	Diagramma fasoriale	100
4.6	Circuito elettrico Inverter	101
4.7	Mappe motore endotermico	103
4.8	Mappa motore endotermico	104
4.9	Schema logico innesto frizione	107
4.10	Modello Batteria & Scap	111
4.11	Circuito elettrico equivalente	112
4.12	Batterie Litio-ioni-Polimeri	114
4.13	Modulo di batteria litio – Polimeri (KOKAM)	115
4.14	Sottomodello Ultracapacitori	116
4.15	Convertitore	116
4.16	Modello Banco di Ultracapacitori	117
4.17	Flussi di Potenza (sistema di accumulo energetico)	119
4.18	Gestore di bordo originale	120
4.19	Sottomodello gestore di bordo	121
4.20	Generatore coppie limite	122
4.21	Esempio di applicazione dei limiti imposti	124
4.22	Selettore delle marce	125
4.23	Profilo di velocità e Relativa Marcia inserita	125
4.24	Accensione motore endotermico	126
4.25	Profilo di Velocità e Comando di Accensione	
	Motore ICE	126
4.26	Diagramma di flusso	128
4.27	Distribuzione delle coppie di riferimento	130
4.28	Diagramma di flusso della potenza	131
4.29	Percorso diretto	132
4.30	Percorso inverso	133
4.31	Esempio di simulazione	135
4.32	Ciclo di Potenza Simmetrico	136

4.33	Tensione V_t	137
4.34	Corrente circolante	138
4.35	SOE	138
4.36	Profilo di Velocità	139
4.37	Spettro del segnale di Velocità	140
4.38	Profilo di velocità (Manche 3 - Giro 11)	141
4.39	Andamenti Velocità Angolari	142
4.40	Tensione di Batteria	143
4.41	Corrente di Batteria	143
4.42	Potenza di Batteria	144
4.43	Utilizzo percentuale della batteria	145
4.44	Andamento del pedale del gas	146
4.45	Andamento della coppia motrice	147
4.46	Andamento del consumo istantaneo di carburante	147
4.47	Consumo di carburante (giro singolo)	148
4.48	Consumo energetico (giro singolo)	148
4.49	Consumo di carburante (gara completa)	149
4.50	Consumo energetico (gara completa)	149
4.51	Errore percentuale consumo di carburante	150
4.52	Errore percentuale consumo energetico	151
5.1	Utilizzo Energ. in Batteria (Sim di Confronto)	155
5.2	Andamento della Velocità (Gara 1, Giro 11)	156
5.3	Riepilogo : Potenze in gioco	157
5.4	Andamento Variabili Elettriche	158
5.5	Andamento Variabili Elettriche	159
5.6	Andamenti Variabili Endotermiche	160
5.7	Andamenti Variabili Endotermiche	161
5.8	Andamento Variabili Supercondensatore	162
5.9	Andamento Variabili Supercondensatore	163
5.10	Andamento Potenze (Gara 1)	164

5.11	Andamento Potenze (Gara 2)	165
5.12	EEC (Singolo giro) [Wh/kgkm]	166
5.13	EEC (Gara completa) [Wh/kgkm]	167
5.14	Risparmio percentuale	168
5.15	Simulazione con Pacco Batteria li-polimeri	170
5.16	Consumi di Carburante complessivi	177
5.17	Consumi di Carburante complessivi	178

Elenco delle Tabelle

1.1	Dati significativi dei cicli cinematici	10
2.1	Carat. (Batterie & Condensatori elettrochimici)	26
2.2	Resistenza dielettrica di dispersione	45
2.3	Dati Batterie	67
2.4	Dati Ultracapacitore	67
2.5	Pesi parziali e totali	67
3.1	N° di giri in base alla tipologia di veicolo	70
3.2	Veicoli cat. VII & VIII (Ibridi ed endotermici)	71
3.3	Veicoli cat. III & IIIA e IV (elettrici)	71
3.4	Categoria VII & VIII	73
3.5	Categoria III & IIIA e IV	73
3.6	Penalità Test di Regolarità	73
3.7	Utilizzo Batteria e Ricarica (Sperimentale)	75
3.8	Coefficienti di Conversione	78
3.9	BC ENERGY SERIES RAD. D CELL – Maxwell	86
3.10	K2 SERIES – Maxwell	86
3.11	PRISMATIC SERIES EDLC – Ioxus	86
3.12	Peso del banco di Ultracapacitori	88
3.13	Ingombri Supercapacitori	89
4.1	Valori dei guadagni utilizzati dal controllo	96

4.2	Dati di targa Motore elettrico	102
4.3	Dati di targa Inverter	102
4.4	Dati di targa motore endotermico	104
4.5	Batteria Ioni di litio – ThunderSky	113
4.6	Batteria Litio-Polimeri – KOKAM	113
4.7	Dati Tecnici Supercondensatori Maxwell	118
4.8	Supercondensatori serie K2 – Maxwell	137
4.9	Dati raccolti su singolo giro	148
4.10	Dati raccolti su gara completa (18 giri)	149
4.11	Errori percentuali	150
5.1	Utilizzo Batteria e Ricarica (Simulazione)	154
5.2	EEC calcolato su singolo giro	166
5.3	EEC calcolato su gara completa	167
5.4	Risparmio percentuale	168
5.5	Simulazioni senza Supercondensatori	169
5.6	Simulazioni con Supercondensatori	169
5.7	Risultati singolo Giro	171
5.8	Risultati Gara Completa	171
5.9	Simulazioni senza Supercondensatori	172
5.10	Simulazioni con Supercondensatori	172
5.11	Risparmi sulle singole gare	174
5.12	Gara con giro ripetuto (Batteria Ioni di litio)	175
5.13	Gara con giro ripetuto (Batteria Litio-Polimeri)	175
5.14	Simulazioni senza Supercondensatori	176
5.15	Sim con Supercondensatori (Batteria Ioni di litio)	176
5.16	Sim con Supercondensatori (Batteria Litio-Po)	176
5.17	Consumi di Carburante	177
5.18	Consumi di Carburante	178

Introduzione

La quasi totalità dei veicoli presenti oggi sulle strade sono equipaggiati con motori a combustione interna. Nonostante il vasto utilizzo e la notevole evoluzione avuta negli anni, i motori a combustione interna presentano ancora oggi un basso rendimento, inoltre tenendo presente che sono alimentati da combustibile fossile, un altro aspetto da non sottovalutare risulta essere quello dell'inquinamento e del reperimento delle risorse combustibili. Negli ultimi anni è stata rivolta grande attenzione verso le problematiche ambientali e le politiche legate allo sfruttamento di una risorsa energetica non rinnovabile quale il petrolio. Da un punto di vista ambientale lo sforzo più consistente riguarda la drastica riduzione delle emissioni inquinanti, mentre da un punto di vista economico e politico la riduzione dei consumi di carburante diminuirebbe la dipendenza da scorte petrolifere in esaurimento e spesso localizzate in aree ad elevata instabilità politica. I veicoli elettrici rappresenterebbero l'opzione migliore per raggiungere l'ideale di una mobilità "pulita", con livelli di efficienza energetica molto elevati. Tuttavia, nella sua recente storia, la trazione elettrica con alimentazione ad accumulatori è utilizzata laddove non interessano autonomia e velocità, ma invece silenziosità ed assenza di gas di scarico. Il salto tecnologico dell'elettronica e dei sistemi di accumulo elettrochimici, ha permesso di migliorare nell'ultimo decennio sia le prestazioni che le autonomie, ma purtroppo non entrambe contemporaneamente, poiché il problema che non è ancora stato risolto risulta essere quello di avere batterie con densità energetica non troppo dissimile da quella dei combustibili liquidi. La soluzione interlocutoria cui si tende sembra essere quella della propulsione ibrida, basata sulla collaborazione di due differenti tipologie di propulsione: elettrica ed endotermica. Mentre i veicoli elettrici puri richiedono ancora notevoli avanzamenti tecnologici, come lo sviluppo di nuovi sistemi

di accumulo on board, per essere competitivi, i veicoli ibridi (HEV, *hybrid electric vehicle*) possono già garantire un'autonomia energetica soddisfacente e livelli di inquinamento estremamente bassi. Essi possono essere visti come una soluzione intermedia in attesa dello sviluppo di sistemi più competitivi. Si tratta dunque di un compromesso, ma forse l'unico praticabile almeno fino a quando si trovi una soluzione per un efficace immagazzinamento dell'energia a bordo.

A partire da questo concetto è stato sviluppato questo lavoro di tesi, il cui obiettivo primario consiste nello studio di un sistema di accumulo on board innovativo per veicoli bimodali (HEV). Infatti, il sistema di accumulo dell'energia incide fortemente sull'autonomia e le prestazioni del veicolo ibrido: l'energia immagazzinabile risulta essere il principale parametro che determina l'autonomia del veicolo, mentre la potenza di picco erogabile stabilisce un limite alle prestazioni ottenibili. Si è quindi cercato di studiare il funzionamento e l'utilizzo dei supercondensatori come accumulatori di energia, utilizzabili in combinato con le batterie al litio per veicoli elettrici. Per questo motivo si prevede di sfruttare i supercondensatori in modo da diminuire i picchi di potenza richiesti dall'azionamento elettrico in batteria e contemporaneamente aumentare l'autonomia.

In particolare, in questo lavoro di tesi si vuole studiare un sistema di accumulo innovativo dell'energia composto da due differenti tipologie di accumulatori. Si vuole cercare di far lavorare insieme *accumulatori di tipo elettrochimico*, ossia le batterie al litio per veicoli elettrici, che permettono di immagazzinare, con un peso ed un volume ragionevoli, elevate quantità di energia, ed *accumulatori di tipo elettrostatico*, ossia i supercondensatori, che assicurano elevatissime potenze di picco, ma con capacità specifiche in peso o volume, relativamente basse. In altre parole, si vuole cercare di sviluppare un sistema di accumulo innovativo dell'energia per veicoli ibridi in grado di garantire, con un peso ed un volume

contenuti, una elevata capacità di immagazzinamento dell'energia e contemporaneamente una rilevante potenza di picco.

Grazie alla capacità dei supercondensatori di ricaricarsi velocemente, durante le fasi di frenata, si cercherà di sfruttare l'energia contenuta nei supercondensatori per alimentare il motore elettrico anche nelle fasi in cui il veicolo bimodale sta utilizzando il motore a combustione interna. Verrà creata una logica di gestione dei due motori, elettrico ed endotermico, in grado di ripartire la richiesta di coppia da parte del veicolo, in modo da diminuire l'utilizzo del motore endotermico. Andando ad agire sulle richieste di coppia dei due motori, si cercherà inoltre, dove possibile, di far lavorare il motore a combustione interna, nelle zone di ottimo rendimento. In questo modo, si prevede di avere una sostanziale diminuzione dei consumi di carburante, mentre al contrario, utilizzando l'energia dei supercondensatori, non si dovrebbero aumentare i consumi energetici in batteria.

Tutte queste prove verranno realizzate per mezzo di un simulatore numerico creato mediante l'ausilio del software Matlab/Simulink[®] ed in grado di ricreare il prototipo bimodale di una Fiat Grande Punto 1.2 con la quale si è disputato il 2° Trofeo Aria Nuova, nell'Autodromo di Monza. Avendo quindi a disposizione i dati sperimentali inerenti alle gare disputate col prototipo bimodale dotato di un pacco batterie a ioni di litio, si cercherà di sviluppare l'innovativo accumulatore di energia in grado di diminuire i consumi elettrici ed endotermici del suddetto veicolo.

Verranno quindi analizzati in dettaglio il principio di funzionamento ed il modello matematico dei Supercondensatori, utili per la costruzione di un modello numerico che ne riproduca il comportamento reale. Successivamente il modulo di supercondensatori, opportunamente dimensionato, verrà inserito all'interno di un simulatore numerico, in grado di riprodurre il comportamento di una autovettura bimodale ed in questo modo verranno valutati i guadagni in termini di con-

sumo energetico e di combustibile in modo da calcolare gli effettivi benefici che si possono avere sul circuito di Monza.

Struttura della Tesi

Stato dell'arte : In questo capitolo si da una panoramica dei veicoli ibridi e bimodali in generale. Viene discusso, in linea di massima, il funzionamento di un veicolo a trazione ibrida, soffermandosi sulle differenze ed i rispettivi vantaggi e svantaggi di una configurazione ibrida serie, parallela o di una configurazione bimodale.

I supercondensatori : In questo capitolo si sviluppa il tema dei supercondensatori, chiamati anche ultracapacitori, viene analizzato lo sviluppo negli anni, il modello matematico ed il principio di funzionamento. Vengono inoltre analizzate le possibili applicazioni in ambito industriale soffermandosi maggiormente sull'utilizzo dei supercondensatori in parallelo con un modulo batteria per veicolo bimodali.

Sistema di accumulo integrato batteria al litio - supercapacità : In questo capitolo si presenta il 2° *Trofeo Aria Nuova*, manifestazione sportiva svolta presso l'autodromo di Monza. Durante le diverse gare, disputate mediante il prototipo bimodale realizzato presso il Politecnico di Milano, si è stati in grado di rilevare sperimentalmente tutte le grandezze (Cinematiche, Elettriche ed Endotermiche) utili per validare il modello numerico realizzato in modo da poter

studiare il dimensionamento del modulo di supercondensatori. Verranno presentate inoltre le formule utilizzate per calcolare i consumi energetici globali (elettrici ed endotermici) utili a valutare i benefici che si ottengono nell'utilizzo di un modulo energetico innovativo rispetto alle batterie al litio per veicoli ibridi, utilizzate durante le diverse gare.

Strategia di controllo del sistema di accumulo ed implementazione nel simulatore numerico : In questo capitolo viene presentato il simulatore numerico utilizzato per valutare i benefici di un modulo di ultracapacitori in parallelo con una batteria agli ioni di litio per veicoli elettrici. Il simulatore, realizzato attraverso il linguaggio di programmazione Matlab/Simulink[®], risulta essere la riproduzione numerica di una Fiat Grande Punto 1.2, il cui prototipo bimodale, alimentato da batterie agli ioni di litio senza l'ausilio supercondensatori, è stato precedentemente realizzato presso il Politecnico di Milano.

Risultati Numerici : In questo capitolo vengono presentate le simulazioni numeriche effettuate con e senza l'utilizzo dei supercondensatori in modo da valutarne gli effettivi benefici. Vengono inoltre analizzate le diverse configurazioni di accumulatori innovativi ed i relativi guadagni che si possono ottenere in termini di consumi di carburante.

Capitolo 1

Stato dell'arte

1.1 Introduzione

Attualmente circolano al mondo circa 700 milioni di veicoli, in Figura 1.1 viene mostrato l'utilizzo percentuale dei veicoli divisi in aree geopolitiche.

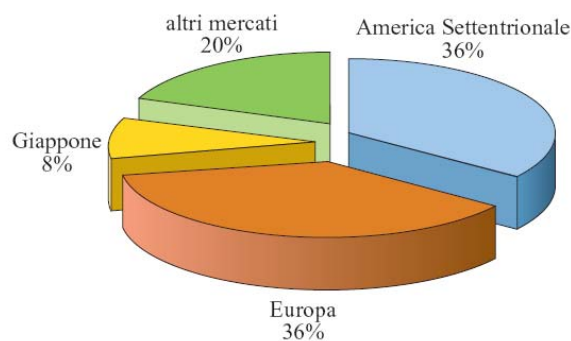


Figura 1.1 – Percentuale di Veicoli nel mondo

Inoltre, si prevede che nei prossimi 50 anni il loro numero crescerà fino ai 2.5 miliardi, in particolare consultando l'*Annuario dei dati ambientali 2003*, fornito dall'APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici), si può osservare come le previsioni siano di 1.2 miliardi di veicoli circolanti solo nel 2020.

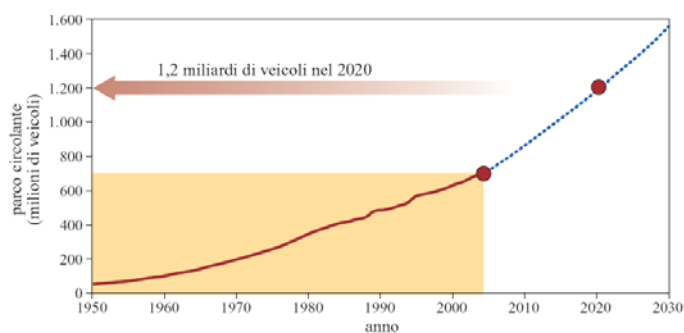


Figura 1.2 – Previsione del parco di veicoli circolanti

Questa prospettiva richiede il perseguimento di due obiettivi principe :

- ✓ l'aumento dell'efficienza della conversione energetica da fonte primaria a lavoro utile per la trazione dei veicoli per contenere lo sfruttamento delle risorse primarie ad un livello accettabile;
- ✓ il contenimento delle emissioni di agenti inquinanti nocivi nei centri urbani per migliorare la qualità dell'aria nelle zone densamente popolate.

Dato poi il peso che i sistemi di trasporto hanno sulle economie dei vari paesi e che una buona fetta del mercato dei veicoli sarà coperta da mercati in via di sviluppo, è anche necessario raggiungere gli obiettivi suddetti con tecnologie di costo contenuto che non impongano freni alle varie economie e non pregiudichino lo sviluppo delle aree in crescita.

1.2 Dal veicolo tradizionale al veicolo ibrido

I margini di azione per poter raggiungere gli obiettivi menzionati possono essere facilmente intuibili facendo riferimento alle caratteristiche di impiego dei sistemi di propulsione dei veicoli terrestri.

I grafici riportati in Figura 1.3 fanno riferimento ad un'autovettura da 1200 kg in grado di percorrere tre dei cicli previsti dall'EPA (Environmental Protection Agency) statunitense per la verifica delle emissioni dei veicoli e precisamente:

- New York City Cycle NYCC (uso urbano con elevata densità di traffico)
- Federal Urban Driving Schedule FUDS (uso urbano con tratto su strada di scorrimento veloce)
- Federal Highway Driving Schedule FHDS (uso su autostrade e strade di scorrimento veloce)

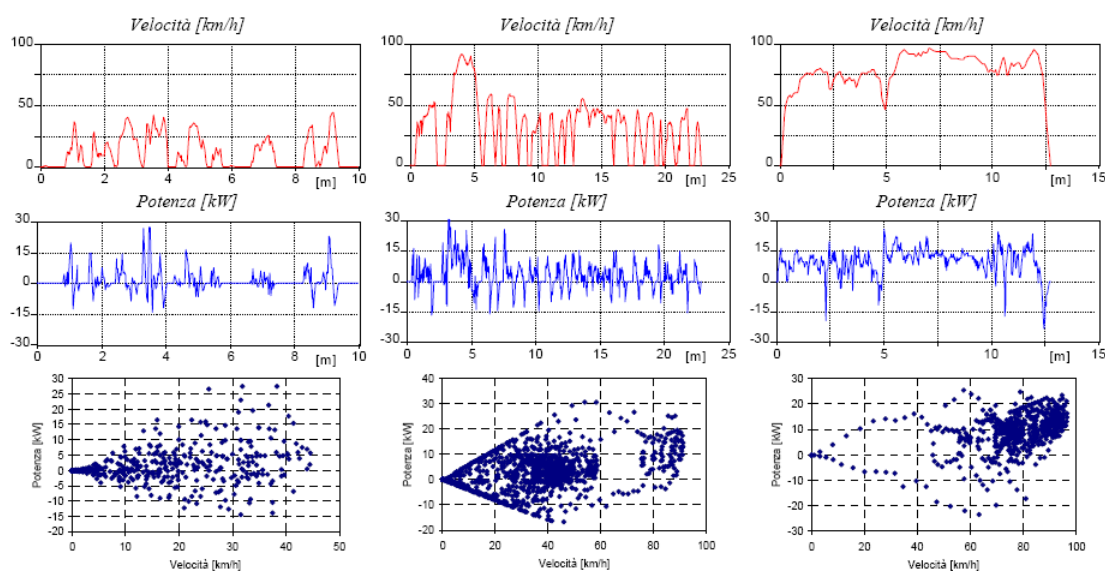


Figura 1.3 - Cicli cinematici standard (EPA)

Per ogni ciclo sono illustrati gli andamenti temporali della velocità del veicolo, la corrispondente potenza richiesta a monte del sistema di trasmissione ed il luogo dei punti velocità-potenza riportati con passo temporale di un secondo. Risulta facile osservare come il sistema di propulsione debba essere in grado di erogare potenza in un ampio range di valori (compresi i valori negativi in frenatura). Dalla densità dei punti visibile nel diagramma velocità-potenza è anche evidente come taluni valori, pur richiedendo un dimensionamento ad hoc del sistema di propulsione, vengano richiesti solo per brevi istanti. In Tabella 1.1 vengono riassunti alcuni dati significativi dal punto di vista dell'impegno di potenza per i 3 cicli presi in considerazione.

Ciclo	-	NYCC	FUDS	FHDS
Potenza Massima	[kW]	27,5	30,7	25,4
Potenza Minima	[kW]	-14,4	-16,8	-23,5
Potenza Media	[kW]	1,0	2,8	9,6
Rapporto Pmedia/Pmax	[%]	3,6	9,1	37,8

Tabella 1.1 - Dati significativi dei cicli cinematici

Un normale motore a combustione interna difficilmente riuscirà a mantenere un'efficienza ottimale in tutto il range di potenze richiesto, infatti, anche ipotizzando di disaccoppiare la velocità di rotazione del motore da quella del veicolo, la curva complessiva di consumo assume l'andamento illustrato in Figura 1.4 come involuppo delle curve di consumo a tutte le possibili velocità di rotazione del motore.

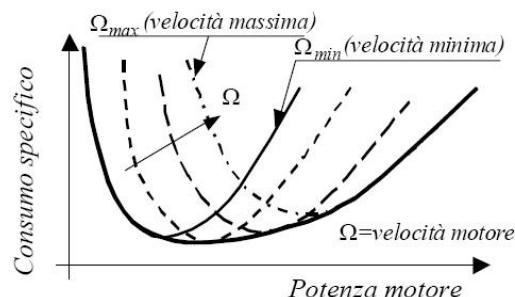


Figura 1.4 - Curve di consumo a velocità costante

Oltre a ciò deve tenersi presente che la potenza negativa, corrispondente ai periodi di frenatura, non può che essere dissipata, non avendo a disposizione un sistema reversibile, e che le emissioni di un motore a combustione interna sono molto influenzate dalla dinamica di funzionamento, peggiorando sensibilmente quando si abbia a che fare con brusche variazioni di regime come accade nei cicli urbani.

Per comprendere al meglio la problematica dell'efficienza di un veicolo, si può far riferimento ai grossi impianti di produzione dell'energia elettrica. Infatti, per essi, è nota la difficoltà che si incontra a realizzare impianti fortemente modulabili, sia in termini di rapidità di risposta, che di mantenimento di un adeguato livello di rendimento. Si ricorre pertanto ad una differenziazione degli impianti di produzione ma anche allo sfruttamento di impianti di pompaggio che consentano di livellare il diagramma di carico. Tutto ciò viene fortemente accentuato nei sistemi di trazione data l'elevata variabilità del carico del sistema di propulsione. Inoltre, se alcuni decenni fa i volumi energetici in gioco per i sistemi di trasporto su gomma erano tali da poter accettare basse efficienze ed emissioni non troppo contenute, ciò non è più possibile ai giorni d'oggi.

La soluzione perseguita dai veicoli ibridi, ed in particolare sui veicoli HEV (*hybrid electric vehicle*) di tipo serie, risulta dunque quella di livellare il profilo della potenza generata dal motore a combustione interna provvedendo a produrre una sorta di valor medio della potenza richiesta e ricorrendo ad un contenuto sistema di accumulo per erogare la potenza in più necessaria nei periodi di maggior richiesta (accelerazione, salite, tratti ad alta velocità) e per accumulare la potenza in eccesso nei periodi in cui la generazione è eccedente (frenatura, periodi di fermata o di bassa richiesta), oltre eventualmente per marciare a motore spento ad esempio nei centri urbani. Per quanto concerne i veicoli HEV convenzionali, si cerca di recuperare l'energia cinetica in frenata utilizzandola succes-

sivamente per sgravare l'utilizzo del motore a combustione interna quando si trova a lavorare in zone a bassa efficienza.

Si supponga ad esempio di far funzionare il motore primo alla potenza media richiesta nel ciclo NYCC e si calcolino istante per istante gli integrali, a partire dal tempo iniziale del ciclo, della potenza erogata dal motore primo e della potenza assorbita dal sistema di propulsione, come viene evidenziato nella Figura 1.5 con le curve 1 e 2.

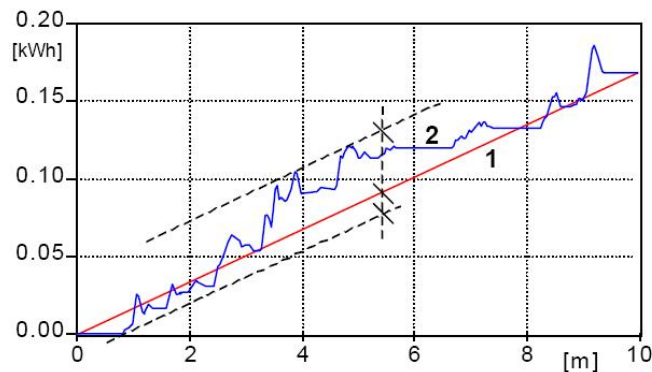


Figura 1.5 - Integrale della potenza effettiva e della potenza media per il ciclo NYCC

Il valore finale, ossia l'energia assorbita nel ciclo, dovrà essere lo stesso per le due curve in virtù della definizione stessa di potenza media. Il massimo scostamento tra una curva e l'altra, evidenziato dai segmenti tratteggiati, risulta pari a l'energia che deve essere temporaneamente immagazzinata nel sistema di accumulo per consentire la gestione a potenza costante. Tale scostamento è inferiore a 0.05 kWh e si mantiene a valori ben inferiori a 1 kWh anche per gli altri cicli, come precedentemente illustrato nei dati riportati in Tabella 1.1. Pertanto la realizzazione di una simile logica di gestione non richiede, in linea di principio, elevate capacità di accumulo e diviene particolarmente interessante quando si pensi a tutte le difficoltà incontrate dai veicoli elettrici puri proprio in relazione al sistema di accumulo e quindi alla loro autonomia.

La Figura 1.6 evidenzia come l'evoluzione dal veicolo tradizionale al veicolo ibrido comporti la creazione di un percorso alternativo per l'energia destinata alla propulsione, oltre al percorso diretto dal motore primo attraverso la trasmissione. Il serbatoio energetico, per motivi grafici, risulta unico, mentre nella realtà, i veicoli ibridi dispongono di una batteria (superiore ai 200 V) destinata alla trazione ed una batteria da 12 V utilizzata per gli organi ausiliari.

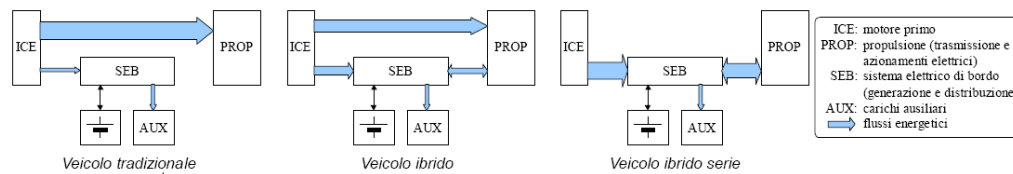


Figura 1.6 - Schema evolutivo: dal veicolo tradizionale al veicolo ibrido

Tale alternativa è costituita dal sistema elettrico di bordo, che può contare sulla capacità di accumulo della batteria (opportunosamente dimensionata) per fornire potenza di propulsione in maniera disgiunta dal motore primo. Nella Figura 1.6, gli spessori delle frecce sono indicativi del volume e del senso dei flussi di energia impegnati, ad esclusione delle fasi di avviamento del motore primo.

La soluzione concettualmente più simile al veicolo tradizionale (detta ibrido minimo) è quella di sostituire l'alternatore ed il motorino di avviamento con un'unica macchina (detta Integrated Starter Alternator: ISA) di potenza massima nell'intorno dei 10 kW collegata meccanicamente all'albero motore ed elettricamente al sistema di bordo al nuovo livello di tensione di 42 V. Tale macchina, avente, rendimenti di conversione intorno all'85% anziché l'attuale 40% degli alternatori di bordo, associata ad un opportuno sistema di accumulo, è in grado di fornire potenza aggiuntiva al motore nelle fasi di massima richiesta, di effettuare la frenatura a recupero e di consentire il funzionamento in start/stop del motore primo dati i tempi di avviamento di circa 0.2 secondi, riducendo così i consumi del 10-15%.

1.3 Stato dell'arte dei veicoli ibridi

Per veicolo ibrido si intende un veicolo in cui l'energia per la propulsione può provenire da due o più sorgenti diverse. Un veicolo ibrido elettrico è tale se almeno una delle suddette sorgenti è in grado di fornire energia elettrica. Per evitare confusione tra le molteplici configurazioni possibili di sistemi di generazione e di accumulo, in letteratura si riserva il termine di veicolo ibrido elettrico (Hybrid Electric Vehicle: HEV) al sistema costituito da un motore a combustione interna ed un motore elettrico, con ovviamente un sistema di accumulo integrato [1]. Tale configurazione, attualmente la più matura, è anche quella che consente di poter sviluppare veicoli innovativi senza dover necessariamente creare una infrastruttura onerosa per la loro ricarica (veicoli elettrici puri) o rifornimento (veicoli a celle a combustibile), ma sfruttando la normale rete di rifornimento dei carburanti per autotrazione.

A seconda della topologia di bordo sono poi identificabili due strutture di base dei veicoli ibridi [2] che rispondono alle seguenti classificazioni:

- ✓ ***Veicolo ibrido elettrico serie*** : veicolo ibrido elettrico in cui la potenza meccanica di propulsione è fornita esclusivamente da un motore elettrico, a sua volta alimentato da una batteria, ricaricata per mezzo di un motore a combustione interna.

- ✓ ***Veicolo ibrido elettrico parallelo*** : veicolo ibrido elettrico in cui la potenza meccanica di propulsione può essere fornita da più sistemi di conversione (motore elettrico e motore a combustione interna).

L'ibrido serie si avvicina al principio di un veicolo elettrico puro a cui sia stata data la possibilità di effettuare la ricarica a bordo con un sistema di generazione, al contrario l'ibrido parallelo risulta molto più simile ad un veicolo tradizionale

in cui il motore elettrico coopera con quello a combustione interna per coprire i picchi di richiesta e consentire il recupero in frenatura.

Lo schema di principio di un veicolo ibrido serie è riportato in Figura 1.7.

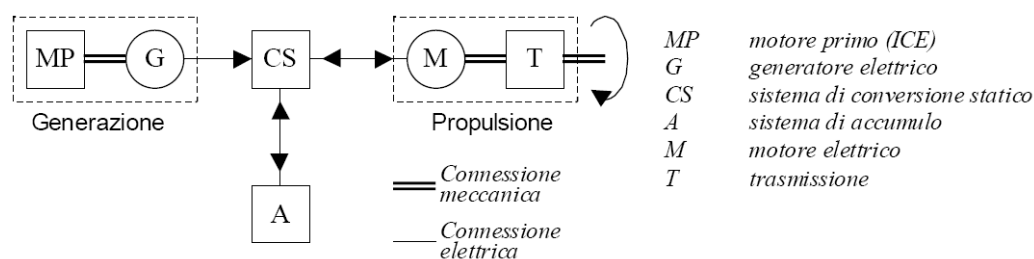


Figura 1.7 - Schema di principio di un veicolo ibrido elettrico serie

I sensi dei flussi di potenza si riferiscono al funzionamento normale esclusi gli avviamenti del motore primo in cui il generatore può, a seconda delle scelte progettuali, essere utilizzato come motore di avviamento assorbendo energia dal sistema di accumulo.

La configurazione ibrida serie è caratterizzata dalla conversione obbligata in energia elettrica dell'energia necessaria alla propulsione pertanto, nel caso più comune di convertitore energetico primario costituito da un motore termico, è presente un disaccoppiamento tra l'asse meccanico del motore primo e le ruote. Ciò consente di utilizzare differenti sistemi di generazione dell'energia elettrica utilizzando motori termici o celle a combustibile, di ottimizzare la gestione del motore primo in relazione alle richieste di potenza, potendo ad esempio lavorare sempre sull'involuppo delle curve di Figura 1.4 ed inoltre, in relazione alla flessibilità della trazione elettrica, di eliminare frizioni, cambi ed anche il differenziale utilizzando un motore per ruota.

Il sistema di conversione statico ha la funzione di interfacciare le batterie con il sistema di generazione dell'energia elettrica e con il motore elettrico di propul-

sione. Esso può essere costituito da uno o più convertitori statici, in relazione al valore ed alle caratteristiche della tensione fornita dal sistema di generazione dell'energia elettrica, al valore della tensione delle batterie e alle caratteristiche della macchina elettrica di propulsione. Quest'ultima deve comunque essere alimentata tramite opportuno convertitore per regolare coppia e velocità da fornire alle ruote del veicolo.

Un veicolo ibrido parallelo è schematizzabile secondo la Figura 1.8.

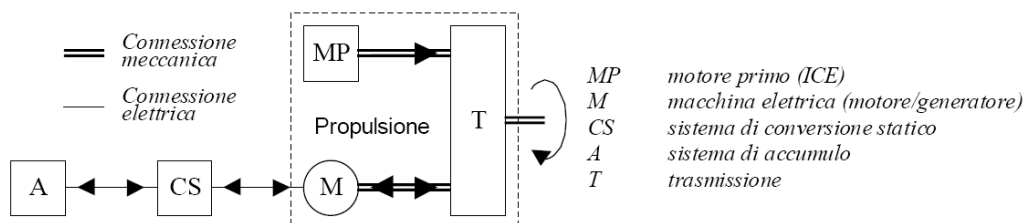


Figura 1.8 - Schema di principio di un veicolo ibrido elettrico parallelo

A differenza dello schema serie, nel veicolo ibrido parallelo, sia il motore elettrico che il motore a combustione interna possono fornire contemporaneamente potenza meccanica alla trasmissione. Esistono poi varie configurazioni in relazione alle modalità di trasmissione della potenza dai due sistemi di trazione alle ruote del veicolo e dei dispositivi di interconnessione utilizzati: cambio, frizioni meccaniche di tipo on/off (non modulabili) o a slittamento (modulabili a dissipazione di energia), rotismi epicicloidali, “frizioni” elettromeccaniche attive (modulabili a recupero di energia).

In generale è possibile far funzionare singolarmente ciascuno dei due sistemi di propulsione (trazione elettrica pura e trazione convenzionale) oppure combinandone il contributo su un opportuno sistema di trasmissione (trazione ibrida).

Questa tipologia di veicolo è concettualmente analoga ad un veicolo tradizionale assistito dalla propulsione elettrica (Electrically Assisted ICEV) [3].

A differenza del sistema serie, il veicolo ibrido, nella configurazione di parallelo puro, necessita di due sole macchine rotanti (il motore primo e la macchina elettrica) anziché tre (motore primo, generatore, motore elettrico) e si presta alla realizzazione di veicoli multifunzione, adatti cioè sia alla circolazione urbana che extraurbana anche con lunghi tratti ad elevata potenza.

Punto critico è il sistema di trasmissione meccanica che richiede numerosi organi, tra cui frizioni e rotismi vari, con conseguenti dissipazioni di energia oltre che con numerosi vincoli costruttivi legati alla disposizione dei vari componenti. Oltre a ciò il legame tra la velocità del veicolo ed il punto di lavoro del motore primo non è completamente libero e spesso ciò non consente di far funzionare il motore ad un regime ottimale. Alcuni benefici possono essere ottenuti utilizzando rotismi epicicloidali per i quali le velocità di due dei tre assi facenti capo al rotismo possono essere imposte in maniera indipendente restando vincolata la terza. Il layout di un veicolo di tipo serie è invece notevolmente più flessibile e consente di ottimizzare il funzionamento del motogeneratore oltre che evitare ingombranti organi e sistemi di trasmissione.

Inoltre, risulta utile specificare che per auto ibrida elettrica plug-in o ibrida plug-in (in sigla PHEV: *plug-in hybrid electric vehicle*) [4] si intende quella tipologia di auto a motore ibrido con batterie per il motore elettrico che possono essere ricaricate con una spina tramite una fonte di energia elettrica, in modo da evitare la ricarica attraverso il motore a combustione interna. Condivide le caratteristiche di entrambi i veicoli elettrici ibridi tradizionali: ha un motore a combustione interna e un motore elettrico. I veicoli PHEV possono quindi essere sia della tipologia in serie che di quella in parallelo. Risulta utile specificare che la presen-

za di un carica batterie direttamente a bordo del veicolo risulta economicamente giustificata se e solo se l'energia in batteria risulta significativa.

1.4 Veicoli Bimodali

Esiste anche una configurazione detta bimodale [5], in cui la vettura dispone di due motori, uno endotermico ed uno elettrico, ambedue in grado di erogare coppia motrice alle ruote, tramite un'apposita trasmissione meccanica. A differenza della configurazione ibrida, in quella bimodale, i motori non funzionano contemporaneamente, ma ne viene impiegato uno a scelta dal guidatore. Si potranno quindi avere a disposizione, due differenti alternative: il funzionamento in endotermico o in elettrico puro. Nel primo caso, il motore a combustione interna fornisce la coppia motrice, garantendo la stessa autonomia e prestazioni di un'auto tradizionale, al contrario, nel secondo caso l'auto risulta un veicolo puramente elettrico, con autonomia e prestazioni ridotte, ma senza emissioni inquinanti. La trazione in questo secondo caso risulta garantita dal motore elettrico che a sua volta risulta alimentato da batterie.

1.5 Esempi commerciali

Gli esempi commerciali attualmente disponibili sono numerosi, risulta utile ricordare: la Toyota Prius, la Honda Insight e la Toyota Estima [6]. Essi hanno consumi superiori rispetto ai prototipi in via di sviluppo, ma hanno dei costi decisamente più contenuti adottando tecnologie più consolidate per i vari componenti. Tali veicoli, nonostante il loro maggior costo rispetto a comparabili veicoli tradizionali, non sono lontani da avere una effettiva convenienza economica in

termini di risparmi sul combustibile, specie in quelle economie in cui i prezzi al consumo del combustibile sono dell'ordine di 1 €/l, e ciò anche senza dare una valutazione economica ai benefici ambientali dovuti alle ridotte emissioni inquinanti.

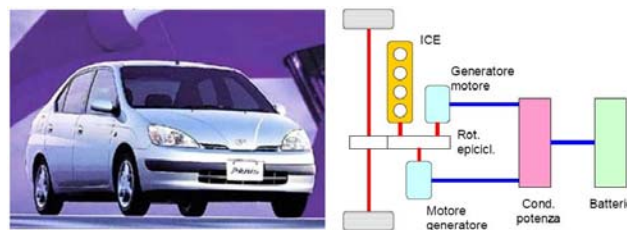


Figura 1.9 – Schema realizzativo : Toyota Prius

La struttura della Toyota Prius è quella di un ibrido serie-parallelo, infatti al sistema motore primo (ICE) e motore elettrico, è aggiunta una seconda macchina elettrica coassiale (etichettata come generatore/motore) che consente, attraverso un rotismo epicicloidale, di eliminare ogni elemento di trasmissione, come CVT e cambio, essendo il differenziale direttamente mosso dall'anello esterno del rotismo solidale con il motore elettrico. Le velocità di rotazione del motore primo e del motore elettrico sono quindi disaccoppiate. L'auto è quindi in grado di muoversi anche a motore spento che entra in funzione solo al raggiungimento di una velocità minima di circa 30 km/h, grazie all'azione del generatore. È peculiare di questa soluzione il doppio percorso consentito all'energia per fluire dal motore primo alla ruota, grazie all'azione combinata delle due macchine elettriche: una parte infatti, attraverso il rotismo, fluisce direttamente dal motore primo alla trasmissione, il resto fluisce attraverso il generatore, lo stadio di condizionamento della potenza e poi il motore elettrico. Ciò consente di scegliere in maniera ottimale il regime di funzionamento del motore primo massimizzandone il rendimento. Inoltre nelle discese e nei tratti a bassa potenza in generale è

possibile spegnere il motore primo e marciare in solo elettrico effettuando eventualmente la frenatura rigenerativa.

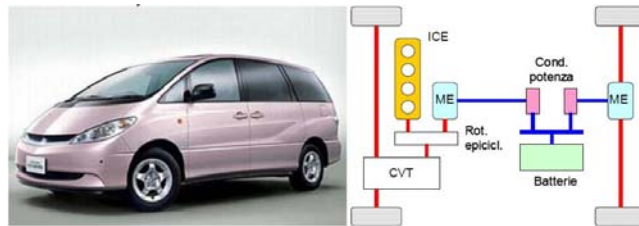


Figura 1.10 – Schema realizzativo : Honda Insight

La Honda Insight, a due soli posti, risulta essere un ibrido parallelo puro, strutturalmente più semplice rispetto al precedente. Il motore primo, vincolato al motore elettrico necessita di un sistema di trasmissione con un variatore di velocità (CVT o cambio manuale). Inoltre non è ammesso il funzionamento in solo elettrico se non mediante l'interruzione dell'alimentazione del combustibile e dell'accensione del motore primo. L'avviamento avviene in maniera istantanea utilizzando il motore elettrico in grado di portare il motore primo al di sopra della velocità di minimo regime.

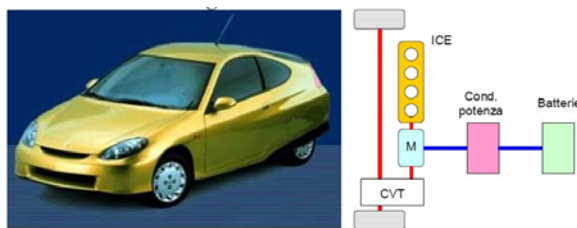


Figura 1.11 – Schema realizzativo : Toyota Estima

La Toyota Estima è invece una realizzazione particolare di veicolo a trazione integrale in cui sono accoppiati un sistema ibrido parallelo per l'asse anteriore con motore primo, macchina elettrica, rotismo epicicloidale e trasmissione con CVT

ed un sistema ibrido serie per l'asse posteriore in cui il motore di trazione preleva l'energia dalle batterie alimentate dal sistema anteriore. Sono possibili quindi la marcia a trazione anteriore o integrale in solo elettrico, la trazione anteriore mista e la trazione integrale mista per l'asse anteriore ed elettrica per il posteriore.

Concludendo, lo sviluppo di veicoli a contenuto impatto ambientale è ormai divenuto un compito non disattendibile da parte della comunità scientifica e delle industrie del settore. La commercializzazione dei veicoli elettrici puri, tuttavia, non ha avuto successo poiché non in grado di soddisfare le aspettative del mercato in termini di prestazioni e costi. Pertanto sono ormai divenuti una realtà commerciale i veicoli ibridi che consentono un sensibile incremento dell'efficienza dello sfruttamento delle risorse primarie ed una ancora più marcata riduzione delle emissioni di agenti inquinanti senza richiedere, come esigenza primaria, lo sviluppo di nuove tecnologie. L'esperienza, dimostrata dal fatto che nel 2009 i veicoli ibridi, venduti da Toyota, risultano oltre i 2 milioni in tutto il mondo, di cui 200.000 solo in Europa, fornisce una spinta incoraggiante a procedere nello sviluppo di tali tecnologie in cui la componente elettrica e la sua gestione assume un valore determinante. Restano ancora da perfezionare le tecnologie inerenti all'accumulo di energia che, sebbene meno critiche rispetto ai veicoli elettrici, costituiscono sempre un elemento fondamentale nell'intero equipaggiamento.

Capitolo 2

I supercondensatori

2.1 Introduzione sui sistemi di accumulo di energia

Allo stato attuale l'energia elettrica può essere accumulata con tecnologie che si differenziano sia per i principi fisici di funzionamento (elettrostatico ed elettrochimico) sia per le caratteristiche prestazionali (potenza specifica, densità di energia, efficienza di accumulo e di riconversione) [7]. Le soluzioni che sembrano essere più adatte a tal scopo, sono rappresentate dalle batterie elettrochimiche, dai sistemi di stoccaggio con accumulo di idrogeno e dai condensatori elettrochimici ed elettrostatici (detti anche supercondensatori o ultracapacitori).

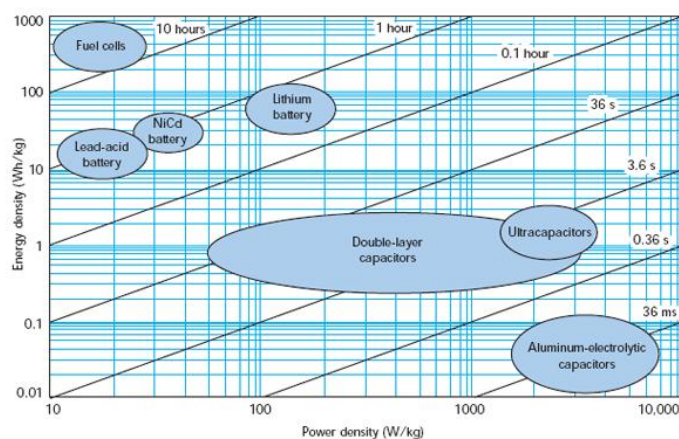


Figura 2.1 - Classificazione dei sistemi di accumulo

Le *batterie elettrochimiche* costituiscono una tecnologia di accumulo consolidata. Esse sono disponibili in commercio con forme costruttive diversificate sia per la geometria sia per le coppie elettrochimiche degli elettrodi. In particolare, le batterie al piombo acido si distinguono per la loro affidabilità ed economicità, oltre che per soddisfacenti caratteristiche di densità di energia e potenza. Esse perciò rappresentano, la soluzione di accumulo più tradizionale per le applicazioni industriali e di generazione distribuita. Esistono poi differenti tipologie di batterie, classificate in base ai materiali di cui sono costituite. Le più diffuse sono le Piombo-Gel, le Nichel Metal Idrato (NiMH), le Nichel Cadmio (NiCad), e quelle al Litio, nella versione a Ioni di Litio (Li-Ion) ed in quella al Litio-Polimeri (Li-Po). Particolare rilevanza hanno le batterie di ultima generazione, ossia le batterie Litio-Polimeri, che pur avendo un tasso di degrado maggiore rispetto alle batterie agli Ioni di Litio per veicoli elettrici, presentano a pari densità di energia un peso nettamente inferiore.

I *supercondensatori* rappresentano una tecnologia di accumulo innovativa, caratterizzata da una densità di energia relativamente bassa (minore dello stoccaggio con idrogeno e delle batterie elettrochimiche) e da una densità di potenza estremamente elevata. Poiché l'accumulo di energia elettrica si basa su processi elettrostatici quasi reversibili, essi presentano, inoltre, un rendimento elevato ed una lunga durata di vita (maggiore di 10^5 cicli di carica-scarica). Per le loro caratteristiche operative, i supercondensatori possono essere impiegati efficacemente in sistemi di accumulo combinati e possono costituire sistemi di supporto alle batterie per alimentare picchi di potenza di breve durata.

I consistenti progressi dell'ultimo decennio nelle tecniche di realizzazione delle *celle a combustibile*, dei sistemi di elettrolisi e la conseguente riduzione dei costi inducono a prevedere, per il prossimo futuro, l'utilizzo dell'idrogeno come sistema di stoccaggio alternativo alle batterie. La maggiore densità di energia rispetto alle batterie suggerisce l'impiego di sistemi con stoccaggio di idrogeno

per le applicazioni che richiedono una considerevole capacità di accumulo con potenze basse. La possibilità di realizzare serbatoi di grosse dimensioni a prezzi contenuti, favorisce, infatti, l'impiego di sistemi a stoccaggio di idrogeno quando è necessario un accumulo di energia per lunghi periodi (accumulo stagionale).

Risulta utile soffermarsi sul confronto tra i supercondensatori e le batterie elettrochimiche. Essi presentano infatti caratteristiche operative complementari [8-9]. Le batterie elettrochimiche sono caratterizzate da un'elevata densità di energia, ma da una bassa densità di potenza, al contrario, gli ultracapacitori, sono caratterizzati da una modesta densità di energia e da una densità di potenza elevata. Le caratteristiche prestazionali delle due tecnologie di accumulo possono essere efficacemente rappresentate sul piano di Ragone (densità di potenza, densità di energia).

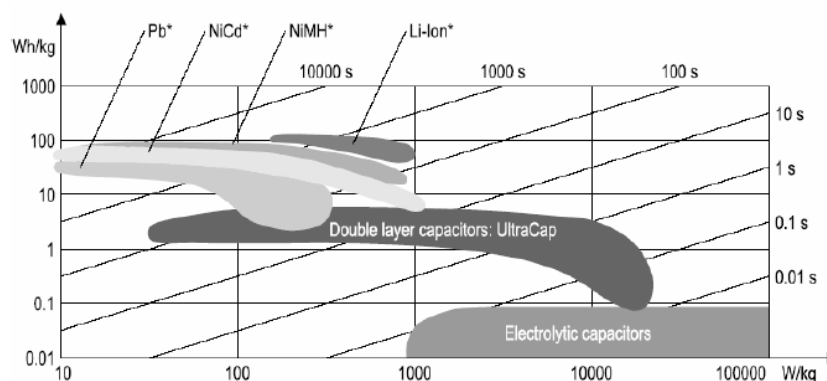


Figura 2.2 – Piano di Ragone

Il diagramma evidenzia come i supercondensatori occupino una regione del piano compresa tra le batterie elettrochimiche e i condensatori tradizionali. Sul piano di Ragone, le linee diagonali riportano il minimo tempo di scarica per i di-

spositivi. I tempi di scarica per le batterie possono variare nell'intervallo tra le decine di minuti e le ore dipendentemente dalle coppie elettrochimiche e dalle caratteristiche costruttive come la geometria degli elettrodi e/o l'area attiva. Al contrario i supercondensatori presentano tempi di scarica variabili da frazioni di secondo a pochi minuti. Il confronto tra le durate di scarica evidenzia come i supercondensatori possano essere adottati per alimentare picchi di carico di breve durata mentre le batterie elettrochimiche possono garantire sufficienti capacità di accumulo. I supercondensatori e le batterie si differenziano anche per la durata di vita e l'efficienza. I meccanismi di carica in un supercondensatore sono prevalentemente elettrostatici e perciò comportano un deterioramento trascurabile degli elettrodi e minori perdite. I supercondensatori hanno quindi una durata di vita fino a 10^6 cicli di carica scarica che è circa di 1000 volte superiore della durata di vita di una batteria.

In Tabella 2.1 vengono riassunte alcune caratteristiche peculiari delle due tecnologie.

	Batterie	Condensatori elettrochimici
Energia Specifica [Wh/kg]	30–45	4–5
Potenza Specifica [W/kg]	60–300	5000
Durata di vita [cicli]	500	500000
Costo [$€/kWh$]	120–150	10000
Tempo di ricarica	Ore	Minuti
Tempo di auto-scarica	Mesi	Giorni
Rendimento	0,7–0,9	0,85–0,98

Tabella 2.1 – Caratteristiche peculiari (Batterie Pb & Double Layer Capacitors)

2.2 Aspetti generali dei supercondensatori

I supercondensatori costituiscono una innovativa tecnologia di accumulo di energia elettrica attraverso campi elettrostatici. Una cella elementare è costituita essenzialmente da due elettrodi porosi, caratterizzati da un elevato rapporto tra superficie e peso, immersi in una soluzione elettrolitica. L'energia è accumulata in prevalenza con un processo elettrostatico nella distribuzione superficiale di carica che si forma nella regione di interfaccia tra ogni elettrodo e l'elettrolita.

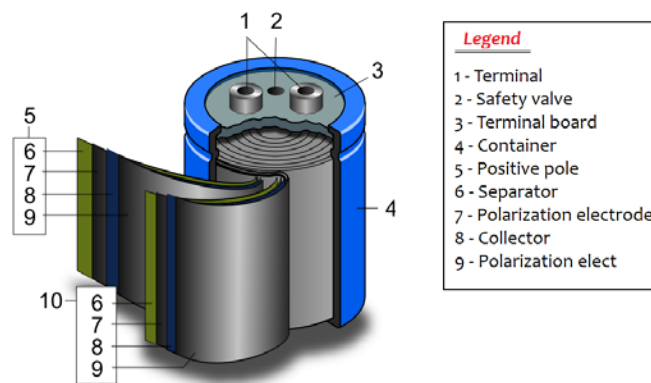


Figura 2.3 - Double layer capacitors

I condensatori elettrostatici sono conosciuti anche con altre denominazioni derivanti dalla loro commercializzazione come, ad esempio :

- ✓ *Double Layer Capacitors*
- ✓ *Supercapacitors*
- ✓ *Ultracapacitors*
- ✓ *Power Capacitors*
- ✓ *Gold Capacitors*
- ✓ *Power Cache*

Abbastanza comune è la denominazione di condensatori elettrochimici a doppio strato (*Electrochemical double – layer capacitor, EDLC*) che descrive il meccanismo primario di accumulo di carica elettrica. Poiché esistono contributi addizionali alla capacità dovuti anche ad altri fenomeni non connessi con il doppio strato, la denominazione di condensatori elettrochimici (*Electrochemical capacitors, EC*) è ritenuta più appropriata. I supercondensatori hanno suscitato interesse perché presentano caratteristiche funzionali intermedie rispetto alle batterie elettrochimiche ed ai condensatori di costruzione tradizionale. Le batterie sono caratterizzate da un'elevata densità di energia (rapporto tra capacità di accumulo e peso) e da una bassa densità di potenza. Risultano, quindi, adatte a processi di carica e scarica lenti con durata di ore. I condensatori tradizionali presentano, invece, una bassa densità di energia e un'elevata densità di potenza e possono essere utilizzati, perciò, in processi di carica e scarica estremamente rapidi con durate di frazioni di secondo. I supercondensatori, per le loro caratteristiche intermedie di densità di energia e di densità di potenza, sono adatti a processi di carica - scarica di durata intorno al minuto. I condensatori elettrostatici possono quindi essere efficacemente adottati come sistemi di accumulo di supporto per assistere le batterie elettrochimiche durante picchi di carico di breve durata sia per le applicazioni ai veicoli elettrici sia per applicazioni di accumulo stazionario in impianti di generazione distribuita.

2.3 Cenni storici

I fenomeni connessi all'accumulo di carica elettrica nella regione di interfaccia tra un elettrodo metallico ed una soluzione elettrolitica erano studiati dai chimici e dai fisici già nel diciannovesimo secolo.

Nel **1853**, il fisico tedesco Helmholtz descrisse la distribuzione di carica a doppio strato. Tuttavia, la prima realizzazione di condensatori elettrochimici a doppio strato (double – layer) si ebbe solo nel **1957**, con una richiesta di brevetto depositata dalla General Electric (Becker). Il brevetto descriveva un primitivo condensatore elettrochimico con elettrodi di carbonio poroso impregnati da un elettrolita acquoso.

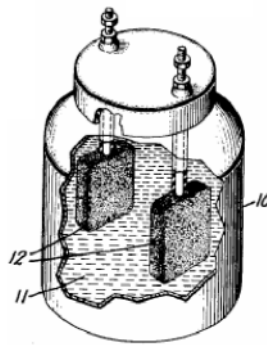


Figura 2.4 - Condensatore brevettato dalla General Electric

Nel **1966**, la SOHIO (Standard Oil Company, Cleveland, Ohio) brevettò un dispositivo simile ancora con elettrodi in carbonio porosi ma immersi in un solvente non acquoso contenente un elettrolita salino disciolto. La maggiore tensione di dissociazione degli elettroliti non acquosi rispetto a quelli acquosi consentiva una tensione operativa relativamente elevata (3,4 – 4,0 V). Il condensatore della SOHIO era caratterizzato, perciò, da una densità di energia maggiore del precedente prototipo della General Electric.

Nel **1970**, la SOHIO brevettò un altro prototipo di condensatore elettrochimico a forma di disco e con elettrodi in pasta di carbonio.

Nel **1971**, un calo nelle vendite costrinse la SOHIO ad abbandonare successivi sviluppi dei suoi prototipi e a cedere le licenze di produzione alla NEC.

La NEC per prima produsse supercondensatori su larga scala commercializzandoli con la denominazione di “*Supercapacitors*”.

Dal **1978** la Matsushita Electric Industrial Co. (commercializzata in occidente come Panasonic), sviluppò i “*Gold capacitor*”.

Nel **1980** i supercondensatori erano già prodotti da più aziende.

Dal **1987** ELNA produsse i suoi condensatori a doppio strato con il marchio “*Dynacap*”.

I dispositivi commercializzati negli anni ‘**80** erano caratterizzati da basse tensioni operative e da una elevata resistenza interna. La loro applicazione prevalente era nei circuiti di alimentazione per le memorie di backup in apparecchi elettronici. I primi supercondensatori di potenza abbastanza elevata furono sviluppati nei primi anni ’80 dalla Pinnacle Research Institute (PRI) per applicazioni militari come armamenti laser e sistemi di guida di missili. I “*PRI Ultracapacitor*”, erano realizzati con elettrodi in ossidi di rutenio/tantalio immersi in una soluzione elettrolitica concentrata a base di acido solforico. Essi presentavano bassa resistenza e un’elevata densità di potenza (superiore a 10 kW/kg) ma una densità di energia di solo 1 Wh/kg .

Negli anni ‘**90** i supercondensatori divennero largamente conosciuti per le loro prospettive di utilizzo sui veicoli elettrici.

Dal **1992** un programma di sviluppo patrocinato dalla United States Department of Energy (DoE) fu condotto nei laboratori della Maxwell per applicazioni veicolari. I condensatori elettrostatici erano immaginati come sistemi di accumulo di supporto per assistere le batterie o le celle a combustibile nei veicoli elettrici sia per fornire energia durante le fasi di accelerazione sia per il recupero in frenatura.

Oggi compagnie come Maxwell Technologies, EPCOS, NEC, Panasonic, ELNA, TOKIN, sono impegnate attivamente nella ricerca e nello sviluppo di tecnologie innovative per i supercondensatori per incrementarne sia la densità di potenza che la densità di energia.



Figura 2.5 - Ultracapacitor , Maxwell Technologies

2.4 Struttura interna di un supercondensatore

Un supercondensatore ha una struttura interna simile ad una batteria elettrochimica perché è costituito da due elettrodi, una soluzione elettrolitica ed un setto di separazione.

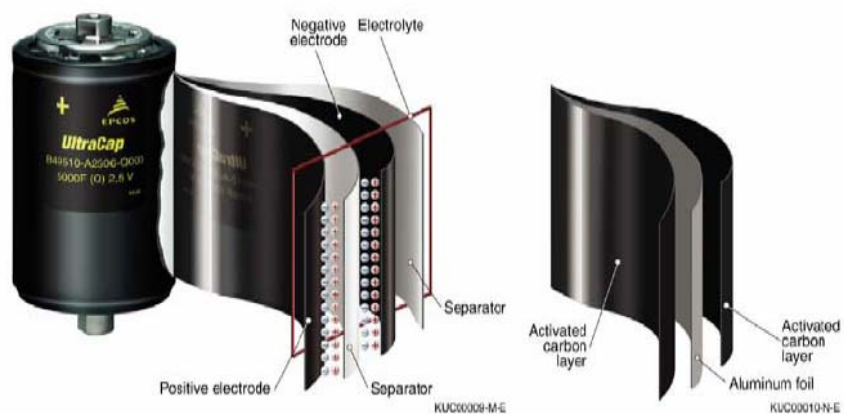


Figura 2.6 - Struttura interna di un condensatore elettrostatico

Il materiale, che compone gli elettrodi ed in particolare le sue proprietà superficiali, riveste un ruolo cruciale per le caratteristiche elettriche di un supercondensatore [10]. Le caratteristiche che devono presentare gli elettrodi risultano essere :

- stabilità a lungo termine
- elevati rapporti superficie/peso
- resistenza alle reazioni di ossidoriduzione

Il carbonio in varie forme è il materiale utilizzato più di frequente per gli elettrodi. Il carbonio è disponibile come polveri, fibre, tessuti con densità di superficie fino a $2500 \text{ m}^2/\text{g}$.

I vantaggi connessi all'utilizzo di materiali carboniosi risultano molteplici :

- bassi costi
- larga disponibilità sul mercato
- elevati rapporti superficie/peso
- tecnologie industriali mature per i processi di produzione

Nei supercondensatori con elettrodi in carbonio, la capacità è dovuta essenzialmente al processo di carica e scarica del doppio strato. Modesti contributi addizionali di pseudocapacità sono dovuti a gruppi funzionali che sono presenti nei carboni attivi. Gli ossidi metallici costituiscono una vantaggiosa alternativa al carbonio per la loro bassa resistività e la loro elevata capacità specifica che potrebbero consentire la costruzione di condensatori con alta densità di energia ed alta densità di potenza. Gli elettrodi in ossidi metallici sono, però, penalizzati dagli elevati costi di produzione. Il comportamento di un supercondensatore con elettrodi in ossidi metallici non può essere descritto dal solo accumulo nella distribuzione a doppio strato ma è la conseguenza anche di una sequenza di reazioni chimiche di ossidoriduzione che avvengono sulla superficie degli elettrodi. Ricerche approfondite sono state condotte sugli ossidi di rutenio per applicazioni militari dove le specifiche di costo sono meno restrittive che nelle applicazioni commerciali. Ulteriori ricerche sono state mirate ad individuare materiali più economici degli ossidi di rutenio anche se le possibilità sono fortemente limitate dalla necessaria presenza di acidi concentrati nelle soluzioni elettrolitiche. Negli elettroliti acquosi il meccanismo primario di accumulo della carica consiste nell'assorbimento di protoni nel reticolo degli elettrodi ed è necessario un acido forte per garantire una sufficiente conduttività protonica. Tale condizione re-

stringe il campo dei possibili materiali per gli elettrodi perché la maggioranza degli ossidi metallici si disciolgono velocemente in soluzioni acide. L'elevata capacità specifica combinata con la bassa resistività consente di conseguire un valore molto elevato di densità di potenza. Poiché gli elettrodi con ossidi metallici sono adatti solo per elettroliti acquosi, la tensione nominale di cella è limitata a circa 1 V. I guadagni in densità di potenza derivanti dalla bassa resistività sono riequilibrati dalle maggiori perdite dovute alla minore tensione operativa. Alcuni studi hanno suggerito l'utilizzo di polimeri conduttori per la realizzazione degli elettrodi. I polimeri accumulano o rilasciano carica elettrica con reazioni di ossidoriduzione. Nella reazione di ossidazione (*doping*) gli ioni sono trasferiti nella matrice polimerica, mentre nella reazione di riduzione (*dedoping*) gli ioni sono rilasciati nella soluzione. L'accumulo di carica nelle pellicole in polimeri conduttori avviene nell'intero volume dell'elettrodo e non solo sulla superficie come con il carbonio. Questa caratteristica consente di conseguire elevati valori di capacità specifica. Per i supercondensatori con elettrodi polimerici sono stati riportati valori piuttosto elevati di densità di potenza e di densità di energia. La contrazione e la dilatazione del polimero durante le operazioni di carica e scarica possono comportare però un deterioramento strutturale. I limiti tecnologici sono oggi costituiti da una scarsa stabilità a lungo termine e da una insufficiente durata di vita in cicli di carica e scarica. La composizione chimica dell'elettrolita ha un ruolo determinante nelle caratteristiche del condensatore elettrostatico. La tipologia dell'elettrodo deve essere specificamente orientata alla tipologia di elettrolita non solo per la scelta del materiale ma anche per la dimensione dei pori. La tensione limite di cella dipende essenzialmente dalla tensione di dissociazione dell'elettrolita, mentre la densità di energia, che è specificamente correlata alla massima tensione applicabile, è limitata in prevalenza proprio dalla natura dell'elettrolita. La conduttività dell'elettrolita influenza la resistenza del supercondensatore alla circolazione di corrente e quindi la sua densità di potenza.

Esistono oggi due tipologie di elettrolita per un condensatore elettrostatico :

- Elettroliti acquosi
- Elettroliti organici

Gli *elettroliti acquosi* limitano la tensione operativa delle celle a circa 1 V, riducendo la possibilità di accumulo di energia rispetto agli elettroliti organici. I vantaggi di un elettrolita acquoso sono connessi alla sua maggiore conduttività elettrica e a vincoli meno stringenti durante il processo di produzione. Inoltre, gli elettroliti acquosi hanno un costo minore rispetto agli elettroliti organici. Infine, il setto separatore previene la possibilità di contatto elettrico tra i due elettrodi, ma deve essere permeabile agli ioni per consentire il trasferimento della carica.

Gli *elettroliti organici* sono i più adottati nelle applicazioni commerciali per la loro maggiore tensione di dissociazione, superiore a 2 V. La tensione operativa di cella è tipicamente di 2,3 V ma sono ammesse sovratensioni transitorie fino a 2,7 V. La tensione di cella è limitata dal contenuto di acqua nell'elettrolita. Alcuni costruttori hanno programmato di aumentare la tensione operativa fino a 3,2 V, con particolari elettroliti a basso contenuto di acqua e rivestendo gli elettrodi in carbonio con strati protettivi per ridurre la corrosione. Gli elettroliti organici presentano, però, una conducibilità elettrica piuttosto bassa. La maggiore resistività dell'elettrolita influisce sulla resistenza equivalente distribuita sulla superficie e di conseguenza riduce la massima potenza disponibile. Tuttavia, una parte della riduzione di potenza è compensata dalla maggiore tensione che può essere applicata sull'elettrolita organico.

Le diverse caratteristiche elettriche rendono l'elettrolita organico più adatto per accumulo di energia, mentre quello acquoso più adatto per alte potenze, come si vede dal diagramma di Ragone in Figura 2.7.

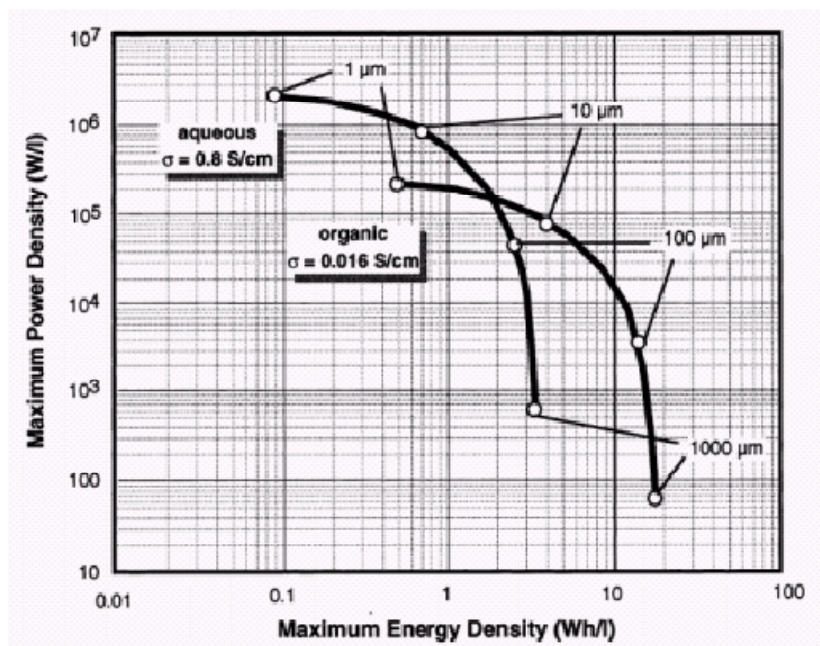


Figura 2.7 – Classificazione elettroliti sul Piano di Ragone

Per elettroliti organici si utilizzano separatori in polimeri o in carta mentre per gli elettroliti organici si preferiscono separatori ceramici o in fibra di vetro. Un separatore dovrebbe essere caratterizzato da un'elevata resistività, un'elevata conduttività ionica ed un piccolo spessore.

2.5 Principio di funzionamento

Quando si applica una tensione su elettrodi immersi in una soluzione elettrolitica, ai due lati delle superfici di interfaccia solido–liquido si produce un accumulo di cariche elettrostatiche di segno opposto. Le due distribuzioni superficiali di carica sono isolate da una pellicola di elettrolita di spessore comparabile con le dimensioni molecolari. Lo spessore del doppio strato dipende dalla concentrazione dell'elettrolita e dalla dimensione degli ioni. Per soluzioni elettrolitiche concentrate lo spessore del doppio strato è di pochi Angstrom (5 – 10 Å, pari a $5 \cdot 10^{-10}$ – $10 \cdot 10^{-10}$ m). Nella letteratura tecnica la specifica configurazione di carica elettrica risultante è indicata come distribuzione a doppio strato (*Helmholtz, Double Layer*), [11]. Durante il processo di formazione del doppio strato non avviene trasferimento di carica attraverso la superficie di interfaccia e la corrente, che può essere rilevata, è dovuta alla sola redistribuzione delle cariche in modo analogo a quanto avviene in un tradizionale condensatore. Una stima approssimativa della capacità di una distribuzione di cariche a doppio strato può essere ottenuta dal modello teorico proposto da Helmholtz nel 1853. Il doppio strato è rappresentato da due strati superficiali di cariche di segno opposto affiancati a distanza molecolare come i due elettrodi di un condensatore.

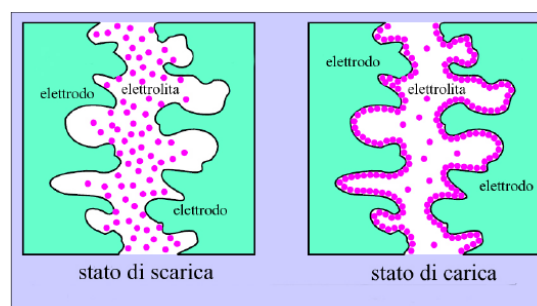


Figura 2.8 - Meccanismo di accumulo di carica nella distribuzione a doppio strato

Uno strato coincide con la superficie dell'elettrodo mentre l'altro strato è composto da ioni ed è localizzato nell'elettrolita. Nel modello di Helmholtz, la capacità C di una distribuzione a doppio strato di superficie A e spessore δ (distanza tra la superficie dell'elettrodo e lo strato di ioni) risulta esprimibile mediante l'equazione 2.1 :

$$\frac{C}{A} = \frac{\epsilon}{4\pi\delta} \quad (2.1)$$

dove ϵ è la costante dielettrica relativa del mezzo interposto tra i due strati (elettrolita), [12].

Per lo spessore microscopico dello stato molecolare che si interpone, con un elettrodo a superficie liscia può essere raggiunta una capacità specifica di 20 – 50 $\mu F/cm^2$. Il campo elettrico corrispondente nella regione di separazione è molto elevato e può anche raggiungere i 106 V/cm . La capacità specifica può essere ancora accresciuta fino a 102 F/g incrementando la superficie esterna degli elettrodi. Gli elettrodi possono essere realizzati, infatti, con materiali porosi caratterizzati da elevati rapporti tra la superficie esterna ed il peso, come il carbone attivo (*activated carbon*) o la polvere di carbonio (*carbon powder*) (103 m^2/g). Il condensatore elettrochimico a doppio strato deve essere costituito da due elettrodi ossia da due distribuzioni di carica a doppio strato. Gli elettrodi sono separati da un setto poroso, contenente lo stesso elettrolita come materiale attivo, che garantisce l'isolamento elettrico senza impedire il passaggio degli ioni. La formazione della distribuzione di carica a doppio strato è il meccanismo primario di accumulo di energia nei condensatori elettrostatici. Reazioni di ossidoriduzione o fenomeni di adsorbimento sulle superfici degli elettrodi costituiscono meccanismi secondari di accumulo di energia. Nella corrente (elettronica o ionica) sugli elettrodi si devono sommare i contributi dovuti sia alla distribuzione a doppio strato sia alle reazioni di ossidoriduzione (corrente faradica). Nella con-

figurazione più semplice di condensatore elettrostatico (double layer capacitors), l'intera corrente che attraversa l'elettrodo è dovuta alla carica o alla scarica del doppio strato. Gli ioni contenuti nell'elettrolita si avvicinano alla superficie dell'elettrodo ma non sono assorbiti o partecipano a reazioni chimiche. Una situazione più complessa nasce se parte degli ioni nel doppio strato sono assorbiti sulla superficie dell'elettrodo (charge transfer) o sono coinvolti in reazioni chimiche. Questi fenomeni secondari consentono al supercondensatore di accumulare più carica che nel semplice processo di carica del doppio strato e la capacità addizionale è denominata pseudocapacità. I condensatori a doppio strato più semplici presentano una maggiore densità di potenza ed una più lunga durata di vita mentre i dispositivi che sfruttano anche la pseudocapacità presentano una maggiore densità di energia.

Occorre infine ricordare come il principio di funzionamento dei supercondensatori risulti condizionato dalla mobilità degli ioni nelle porosità degli elettrodi.

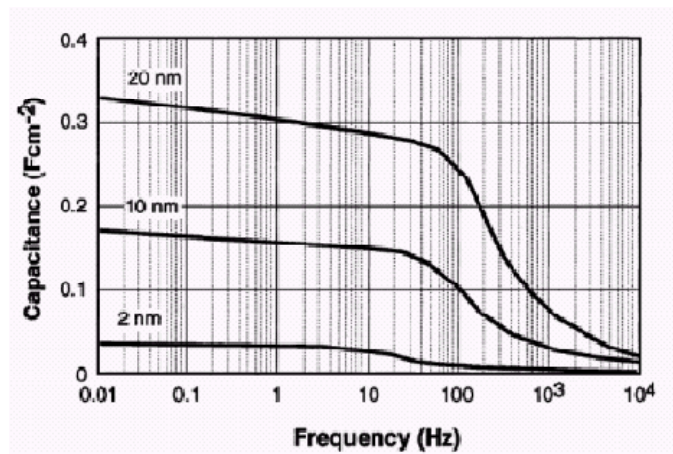


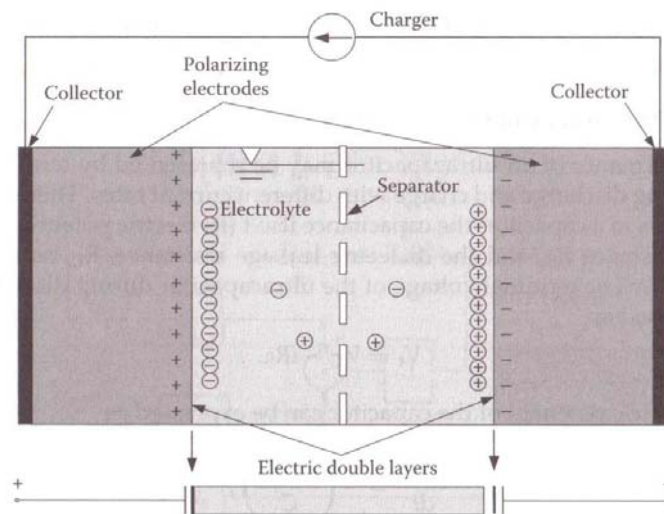
Figura 2.9 - Dipendenza della capacità dalla frequenza per diverse dimensioni dei pori

Per questo motivo, come si vede dalla Figura 2.9, la capacità diminuisce all'aumentare della frequenza, ossia quando si richiede un aumento della veloci-

tà del moto degli ioni. Questa caratteristica rende meno attraenti i supercondensatori per l'impiego in elettronica, ma non altera sostanzialmente la loro funzione come accumulatori di energia.

2.6 Capacitori a doppio strato

La tecnologia dei capacitori a doppio strato risulta essere molto importante per riuscire a comprendere in generale il funzionamento degli ultracapacitori. Il principio base [13] su cui si basa il funzionamento dei supercondensatori viene illustrato in Figura 2.10.



Basic principles of a typical electric double-layer capacitor.

Figura 2.10 - Capacitore elettrico a doppio strato

Quando a due barre di carbonio, separate tra loro ed immerse in una soluzione di acido solforico, viene applicata una tensione crescente da 0 V a 1.5 V, iniziano a comparire delle bolle sulle superfici di entrambi gli elettrodi. In realtà, non succede nulla fino a che non si raggiunge una tensione di circa 1 V, successivamen-

te nell'intorno di 1.2 V si incominciano ad intravedere le prime bolle che indicano la decomposizione elettrica dell'acqua. Il processo di decomposizione risulta inverso a quello di elettrolisi in cui si usa l'energia elettrica per far decorre una reazione chimica che non avverrebbe spontaneamente. In questo caso si sfrutta invece una reazione chimica per produrre energia elettrica. Al di sotto della tensione di decomposizione ed a corrente circolante nulla, si crea un “doppio strato elettrico” al confine tra elettrodo ed elettrolita. Gli elettroni vengono caricati mediante il doppio strato del condensatore, infatti il doppio strato elettrico lavora come isolante solo al di sotto della tensione di decomposizione.

L'energia immagazzinata risulta espressa mediante l'equazione 2.2 :

$$E_{cap} = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.2)$$

dove con C si intende la capacità del condensatore espressa in faraday e con V i valori di tensione utilizzabili in volt.

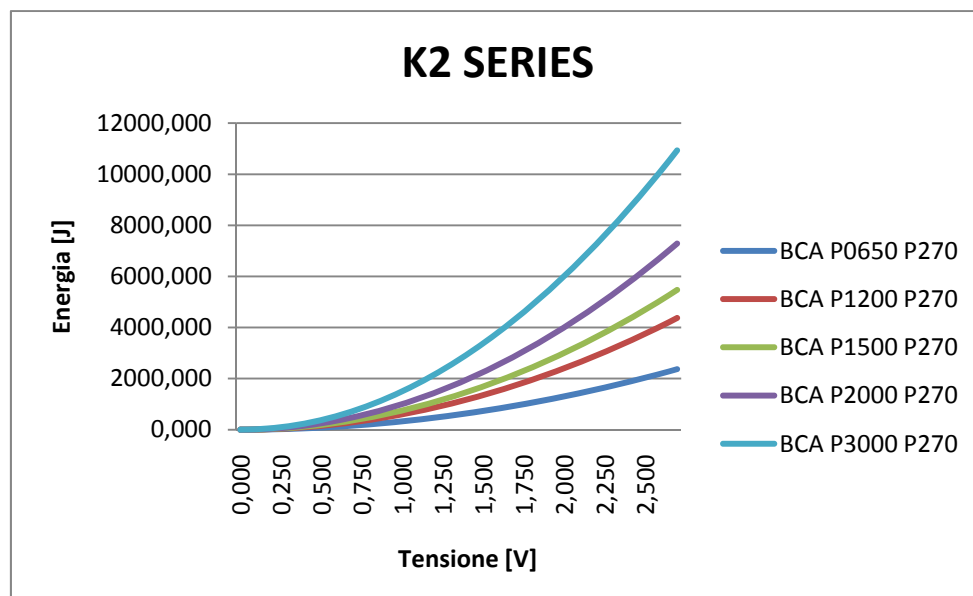


Figura 2.11 – Energia interna di un supercondensatore in funzione della tensione totale

Questa equazione indica che alti valori di tensione producono elevati valori di energia all'interno del condensatore, essendo quadratica la dipendenza dell'energia immagazzinata dalla tensione.

Fino ad ora, la tensione nominale di un condensatore con soluzione acquosa elettrolitica risulta essere pari a 0.9 V per cella, mentre quella di un condensatore senza la soluzione acquosa elettrolitica risulta compresa tra 2.3 – 3.3 V per ogni cella. Si hanno dei notevoli vantaggi se si utilizza un doppio strato elettrico in sostituzione a materiali come plastica o film di ossido di alluminio. Bisogna però garantire un doppio strato elettrico molto sottile ed una capacità molto elevata $2.5 - 5 \mu F/cm^2$. Al fine di aumentare la capacità degli elettrodi, questi vengono realizzati mediante specifici materiali che presentano una superficie molto grande, come i carboni attivi, che sono famosi per la loro superficie di $1000 - 3000 m^2/g$. In questo modo, gli ioni vengono assorbiti da queste superfici, producendo come risultato $50 F/g$. Supponendo anche venga raggiunto il peso di un elettrolita, una densità di $25 F/g$ risulta essere già abbastanza elevata. Tuttavia, la densità di energia di questi condensatori è di gran lunga inferiore a quella delle tipiche batterie. Infatti attualmente l'energia specifica di un ultracapacitore è pari a $2 Wh/kg$ il che risulta $1/20$ rispetto a quella fornita dalle batterie al piombo pari a $40 Wh/kg$.

2.7 Modello matematico

Nella letteratura tecnica sono proposti diversi modelli per rappresentare i complicati fenomeni che avvengono all'interno di un supercondensatore. Un modello semplice, ma anche abbastanza soddisfacente, per rappresentare il comportamento dinamico di un condensatore elettrostatico consiste in una sua rappresentazione con un circuito elettrico equivalente del primo ordine, [14].

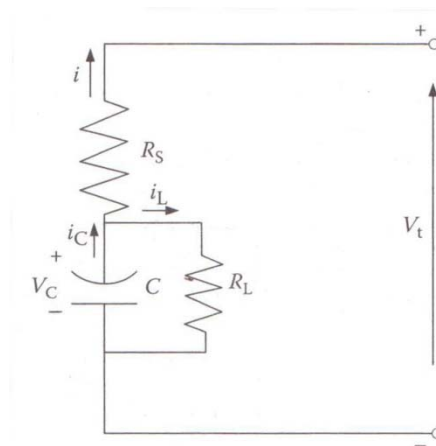


Figura 2.12 - Circuito elettrico equivalente per un condensatore elettrostatico

I parametri principali di un condensatore risultano essere :

- C – Capacità [F]
- R_S – Resistenza di serie [Ω]
- R_L – Resistenza dielettrica di dispersione (resistenza in parallelo) [Ω]

I fenomeni connessi all'accumulo di energia nella distribuzione di carica a doppio strato sono rappresentati dalla capacità C , che, in genere, è ricavata sperimentalmente misurando l'energia ΔE assorbita dal condensatore elettrostatico durante una carica tra due tensioni di riferimento V_1 e V_2 e trascurando le perdite

ohmiche su R_S . Note queste variabili, risulta possibile valutare la capacità C , espressa in Farad, mediante la seguente equazione.

$$C = \frac{2 \cdot \Delta E}{V_1^2 - V_2^2} \quad (2.3)$$

La resistenza in serie R_S tiene conto dei fenomeni di dissipazione che avvengono durante i processi di carica e scarica. Essa può essere determinata misurando la costante di tempo τ_S per la scarica su un carico ohmico di resistenza R , mediante l'equazione 2.4.

$$R_S = \frac{\tau_S}{C} - R \quad (2.4)$$

La resistenza parallelo R_L riproduce, invece, i fenomeni di autoscarica che intervengono per periodi di tempo lunghi (giorni) e si può ricavare dalla costante di tempo di autoscarica τ_P , utilizzando l'equazione 2.5.

$$R_L = \frac{\tau_P}{C} \quad (2.5)$$

Durante intervalli di tempo sufficientemente brevi, la resistenza R_L può essere trascurata ed il supercondensatore può essere rappresentato come un circuito RC serie.

La resistenza in parallelo, chiamata anche resistenza dielettrica di dispersione, può essere facilmente determinata una volta isolato il circuito di interesse.

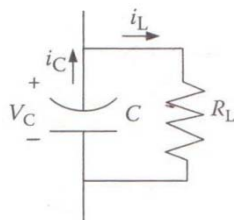


Figura 2.13 - Circuito elettrico equivalente

Infatti, solitamente i costruttori di ultracapacitori, non presentano direttamente il valore della resistenza dielettrica, ma forniscono il valore della tensione continua di picco e della corrente di dispersione. Mediante questi due dati risulta possibile determinare il valore della resistenza dielettrica di dispersione, con l'ausilio dell'equazione 2.6.

$$R_l = \frac{V_c}{i_l} \quad (2.6)$$

Mediante le specifiche tecniche fornite dalla Maxwell Technologies e Ioxus Technologies, riguardanti gli ultracapacitori a cella, modulo integrato e prismatici EDLC risulta possibile definire l'ordine di grandezza delle resistenze dielettriche di dispersione.

Parametri		BCA P0010	BMOD0115	BMOD0117	RSC2R7108SP	RSC2R7208SP	RSC2R7308SP	RSC2R7508SP
		<i>cell</i>	<i>module</i>	<i>module</i>	<i>prismatic EDLC</i>	<i>prismatic EDLC</i>	<i>prismatic EDLC</i>	<i>prismatic EDLC</i>
Tensione	V	2,5	42,0	14,0	2,7	2,7	2,7	2,7
Corrente di dispersione	A	0,0050	0,0100	0,0100	0,0055	0,0020	0,0050	0,0065
Resistenza di dispersione	Ω	500,00	4200,00	1400,00	490,91	1350,00	540,00	415,38

Tabella 2.2 – Resistenza dielettrica di dispersione

Le prestazioni di un ultracapacitore possono essere rappresentate mediante la tensione terminale V_t , che viene raggiunta durante il processo di scarica e carica, a diversi valori di corrente. La tensione terminale di un ultracapacitore, durante il processo di scarica può essere espressa mediante l'equazione 2.7.

$$V_t = V_c - i \cdot R_s \quad (2.7)$$

Il potenziale elettrico viene invece determinato mediante l'equazione 2.8.

$$\frac{dV_c}{dt} = - \frac{i+i_l}{C} \quad (2.8)$$

Se si sostituisce l'espressione della corrente dielettrica, espressa dall'equazione 2.9 :

$$i_l = \frac{V_c}{R_l} \quad (2.9)$$

all'interno dell'equazione 2.8, si può ottenere l'equazione 2.10.

$$\frac{dV_c}{dt} = - \left(\frac{V_c}{C \cdot R_l} + \frac{i}{C} \right) \quad (2.10)$$

Integrando quest'ultima equazione, risulta possibile ottenere l'espressione della tensione dell'ultracapacitore V_c .

$$V_c = \left[V_{c0} - \int_0^t \frac{i}{C} \cdot e^{t/C \cdot R_l} \cdot dt \right] e^{-t/C \cdot R_l} \quad (2.11)$$

Risulta quindi possibile determinare la tensione V_t utilizzando l'equazione 2.7.

L'andamento della tensione durante il processo di scarica viene mostrato nella seguente Figura.

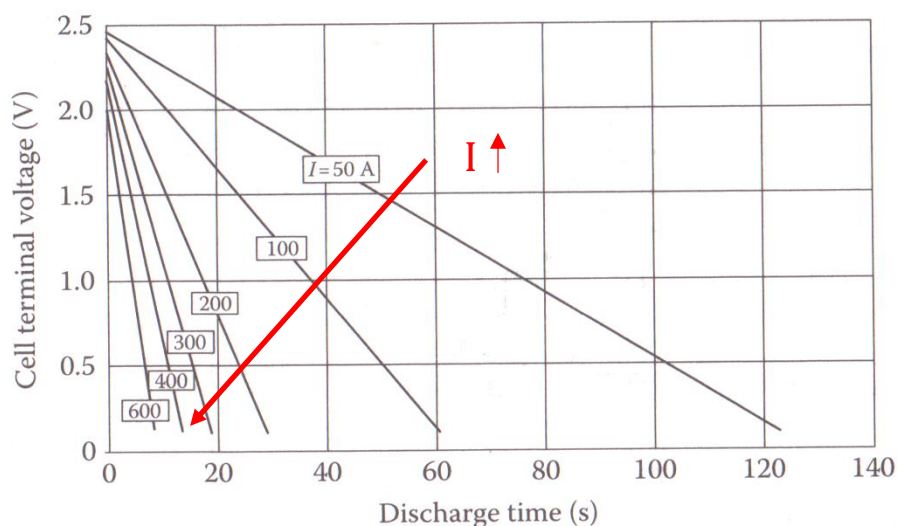


Figura 2.14 - Caratteristica di scarica (Ultracapacitore 2600F , Maxwell Technologies)

La caratteristica di scarica mostrata risulta quella relativa ad un supercapacitore Maxwell 2600F e è dipendente dalla corrente di scarica. In particolare la tensione decresce più velocemente quando si hanno elevati valori di corrente di scarica, al contrario per bassi valori di corrente la tensione decresce meno velocemente nel tempo.

Ovviamente, un modello analogo può essere usato anche per descrivere la caratteristica di carica di un ultracapacitore.

2.8 Efficienza di funzionamento

L'efficienza di funzionamento, differente nel caso di processo di scarica e di carica, può essere espressa mediante le seguenti equazioni.

$$\eta_d = \frac{V_t \cdot I_t}{V_c \cdot I_c} = \frac{(V_c - R_S \cdot I_t) \cdot I_t}{V_c \cdot (I_t + I_l)} \quad (2.12)$$

$$\eta_c = \frac{V_c \cdot I_c}{V_t \cdot I_t} = \frac{V_c \cdot (I_t - I_l)}{(V_c + R_S \cdot I_t) \cdot I_t} \quad (2.13)$$

Dove con V_t si intende la tensione terminale, mentre con I_t la corrente terminale di input o di output.

Durante il funzionamento dell'ultracapacitore, la corrente di dispersione risulta molto bassa, ossia nell'ordine dei mA e può quindi essere trascurata. In questo modo, le equazioni possono essere semplificate come mostrato nell'equazioni 2.14 e 2.15.

$$\eta_d = \frac{(V_c - R_s \cdot I_t) \cdot I_t}{V_c \cdot I_t} = \frac{(V_c - R_s \cdot I_t)}{V_c} = \frac{V_t}{V_c} \quad (2.14)$$

$$\eta_c = \frac{V_c \cdot I_c}{V_t \cdot I_t} = \frac{V_c \cdot I_t}{(V_c + R_s \cdot I_t) \cdot I_t} = \frac{V_c}{(V_c + R_s \cdot I_t)} = \frac{V_c}{V_t} \quad (2.15)$$

Queste equazioni mostrano come la perdita di energia in un supercondensatore sia causata dalla presenza della resistenza di serie. L'efficienza dell'ultracapacitore decresce, come mostrato nel grafico sottostante, al crescere della corrente e per valori bassi di tensione.

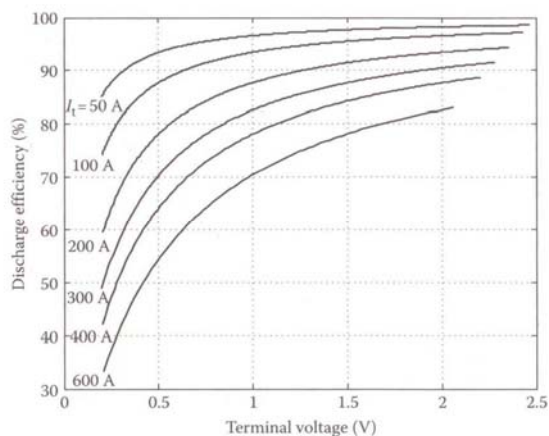


Figura 2.15 - Efficienza percentuale nel ciclo di scarica

Per questo motivo, durante il funzionamento dell'ultracapacitore, risulta conveniente lavorare con valori di tensione superiori al 60 % della tensione nominale.

2.9 Calcolo dello stato di carica di un supercondensatore

L'energia immagazzinata in un supercondensatore può essere ottenuta attraverso l'energia necessaria per ottenere un certo livello di tensione. Matematicamente, può essere ricavata mediante l'integrale del prodotto di tensione e corrente dell'ultracapacitore:

$$E_c = \int_0^t V_c \cdot I_c \cdot dt = \int_0^V C \cdot V_c \cdot dV_c = \frac{1}{2} CV_c^2 \quad (2.16)$$

Con l'aumento della tensione nominale di cella, l'energia immagazzinata nel ultracapacitore raggiunge il valore massimo. L'equazione sopra descritta, mostra come l'aumento della tensione nominale può aumentare di molto l'energia immagazzinata nell'ultracapacitore poiché risulta proporzionale al quadrato della tensione V_c . Durante il funzionamento effettivo risulta impossibile utilizzare completamente l'energia immagazzinata a causa della bassa potenza nello stato di bassa energia. Quindi, un ultracapacitore presenta solitamente una tensione di fondo, V_{CB} al di sotto della quale l'ultracapacitore interromperà la fornitura di energia. Di conseguenza, l'energia disponibile e utile per l'uso risulta inferiore all'energia a pieno carico e può essere espressa mediante l'equazione 2.17.

$$E_u = \frac{1}{2} C (V_{CR}^2 - V_{CB}^2) \quad (2.17)$$

dove con V_{CR} si intende la tensione nominale.

L'energia utilizzabile in un ultracapacitore può anche essere espressa mediante il coefficiente adimensionale SOE, che risulta definito come il rapporto tra energia

nel ultracapacitore ad una tensione pari a V_C e l'energia immagazzinata alla tensione di carica completa V_{CR} :

$$SOE = \frac{0.5 \cdot C \cdot V_C^2}{0.5 \cdot C \cdot V_{CR}^2} = \left(\frac{V_C}{V_{CR}} \right)^2 \quad (2.17)$$

Come mostrato in Figura, al 60% della tensione nominale corrisponde la tensione di fondo mentre il 40% risulta caduta di tensione. In queste condizioni risulta disponibile per l'uso il 64% dell'energia totale disponibile.

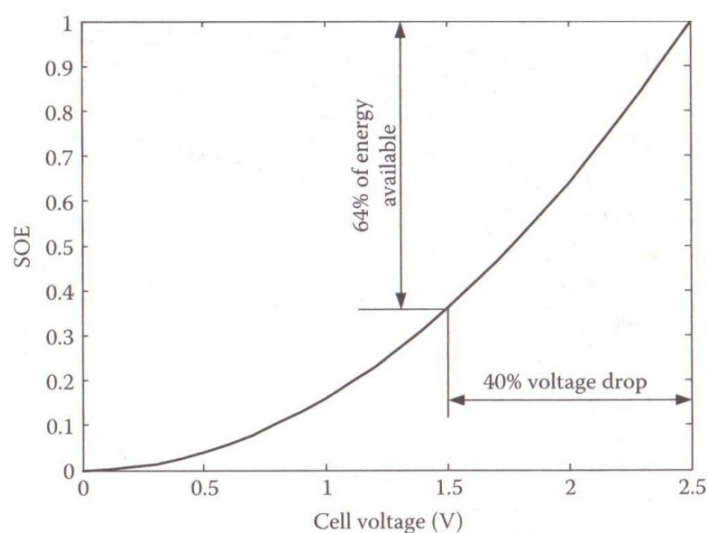


Figura 2.16 - Diagramma SOE

Si ricorda inoltre che le limitazioni sulla tensione V_{CR} risultano dovute anche alla presenza di componenti di elettronica di potenza.

2.10 Schema a blocchi

Le equazioni dell'ultracapacitore nel dominio del tempo risultano essere espresse dal sistema di equazioni 2.19.

$$\begin{cases} V_t = V_c - R_s \cdot i \\ \frac{dV_c}{dt} = -\left(\frac{V_c}{C \cdot R_l} + \frac{i}{C}\right) \end{cases} \quad (2.19)$$

Da cui risulta possibile determinare lo schema a blocchi mostrato in Figura 2.17.

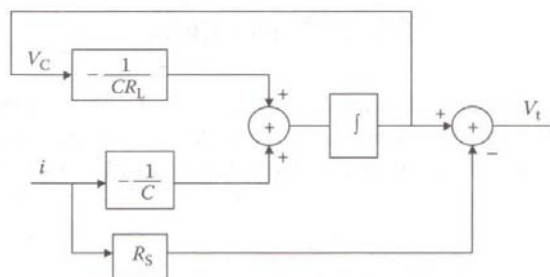


Figura 2.17 - Schema a blocchi Ultracapacitore

Passando nel dominio di Laplace, le equazioni risultano :

$$\begin{cases} V_t(s) = V_c(s) - R_s \cdot I(s) \\ s \cdot V_c(s) = -\frac{V_c(s)}{C \cdot R_l} - \frac{I(s)}{C} \end{cases} \quad (2.20)$$

Da cui risulta possibile esplicitare la funzione di trasferimento tra la tensione V_t di uscita e la corrente I di ingresso.

$$V_t(s)/I(s) = -\frac{(R_s R_L C)s + (R_s + R_L)}{(CR_L)s + 1} \quad (2.21)$$

Mediante la conoscenza della funzione di trasferimento risulta immediato creare il diagramma di Bode, per differenti tipologie di ultracapacitori.

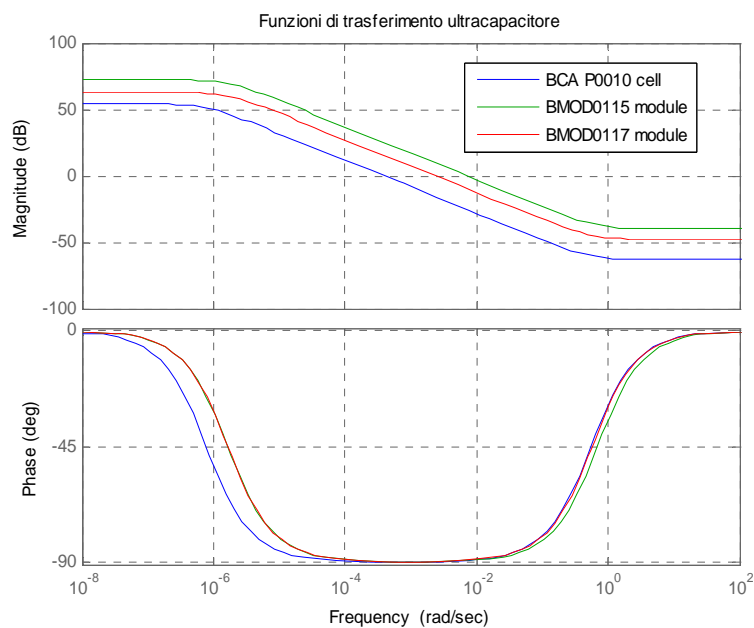


Figura 2.18 – Diagramma di Bode

2.11 - Applicazioni di moduli di supercondensatori

In questo paragrafo, si vuole presentare una panoramica riguardante le diverse possibili applicazioni dei supercondensatori nei sistemi elettrici in generale, [15]. Si intende fornire un'ampia, anche se non esaustiva, panoramica delle varie possibilità di impiego di moduli di supercondensatori nei sistemi elettrici in generale. I motivi di interesse sono diversi, soprattutto sotto il profilo di un migliore utilizzo delle risorse energetiche e del dimensionamento dell'impianto elettrico. Va inoltre tenuto in considerazione il fatto che l'introduzione dei supercondensatori e dei relativi convertitori di interfacciamento con la rete implica un costo aggiuntivo che va analizzato e valutato caso per caso. In particolare la possibilità di conseguire risparmi energetici è legata alla frequenza con cui si susseguono i cicli di accelerazione e frenatura dei dispositivi alimentati dall'impianto elettrico. Risulta quindi necessario svolgere un'analisi di tipo tecnico-economico specifica per ogni caso analizzato, [16].

Frenatura con recupero di convogli metropolitani

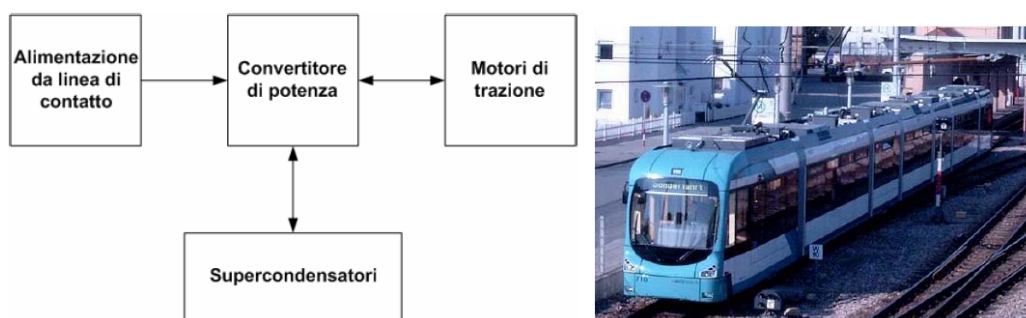


Figura 2.19 - Schema di sistema impiegante supercondensatori su convogli metropolitani

Nei convogli metropolitani, l'energia cinetica sviluppata durante le fasi di frenatura può essere immessa direttamente nella linea di contatto per alimentare i convogli in accelerazione, mentre la eventuale parte eccedente può essere, invece che dissipata, accumulata in batterie di supercondensatori disposti nelle stazioni elettriche di alimentazione dell'impianto per alimentare le utenze di stazione e/o per essere utilizzata in fasi successive in cui più convogli siano in accelerazione. I vantaggi, che possono essere conseguiti mediante l'utilizzo di questa tecnologia, sono rappresentati dal recupero di energia, con conseguente risparmio energetico e dalla riduzione dei picchi di potenza richiesti dagli apparati di alimentazione della linea di contatto, [17]. L'attuazione del recupero evita inoltre di scaldare i tunnel, come accade invece in frenature di tipo dissipativo, col conseguente ulteriore vantaggio di non dover spendere energia per asportare calore dal tunnel stesso. Le batterie di supercondensatori potrebbero, in alternativa, venire alloggiare sugli stessi convogli metropolitani accumulando energia in frenatura ed erogandola al convoglio in fase di accelerazione e/o per l'alimentazione dei servizi di bordo.

Livellamento dei carichi nei veicoli ibridi

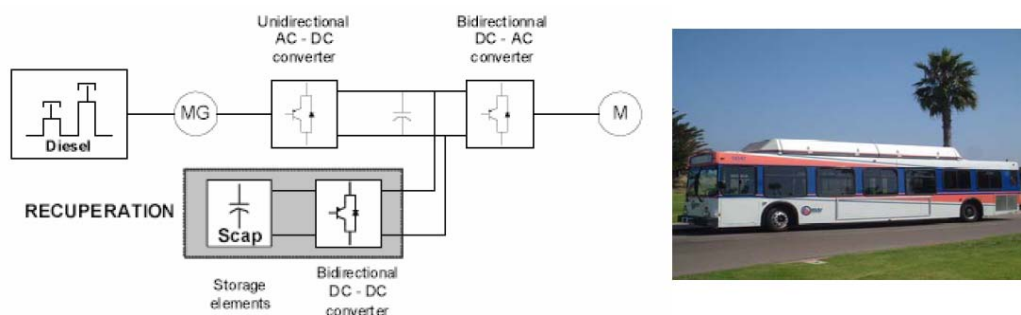


Figura 2.20 – Utilizzo di supercondensatori su veicoli ibridi per il livellamento dei carichi

I sistemi di trazione ibridi costituiscono una fase intermedia nella progettazione dei sistemi di propulsione dei veicoli tra i convenzionali veicoli utilizzando carburanti derivati dal petrolio e la pura trazione elettrica non ancora matura per quanto attiene i dispositivi di accumulo. La presenza di sistemi di accumulo di energia on board innovativi, consente di far lavorare il motore termico in condizioni ottimali sotto il profilo del rendimento, rendendo possibile contemporaneamente il recupero di energia in frenatura e la riduzione della potenza sviluppata dal motore endotermico durante le fasi di accelerazione del veicolo.

Ricarica di mezzi di trasporto su strada

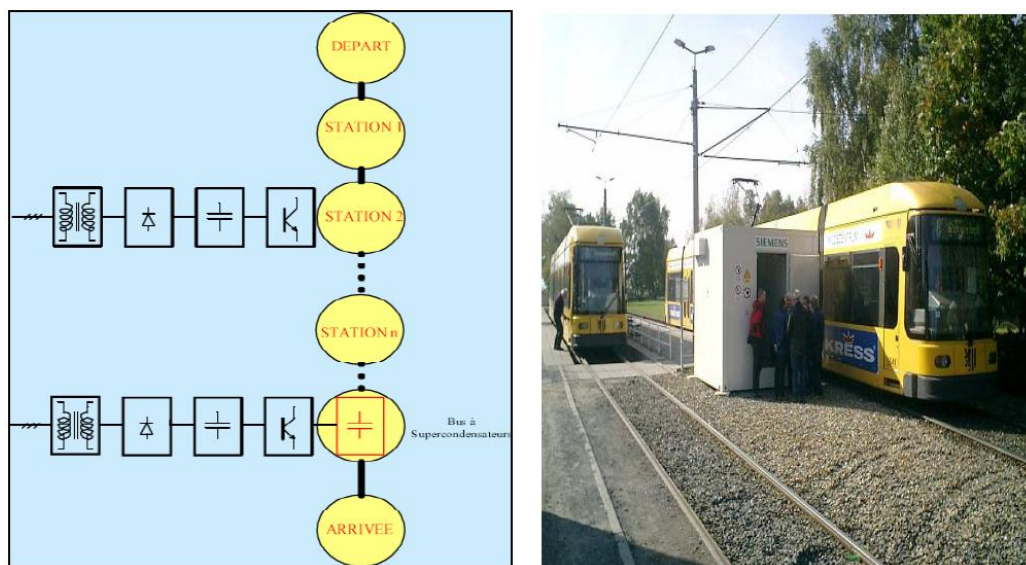


Figura 2.21 - Schema di sistema per mezzi di trasporto stradali

In linea di principio il sistema risulta essere costituito da moduli di supercondensatori, in grado di ricaricarsi nell'intervallo di tempo che intercorre tra il passaggio di due mezzi di trasporto, installati in corrispondenza delle pensiline e da moduli di condensatori installati sul mezzo di trasporto, che sono in grado di

prelevare l'energia dai condensatori fissi. L'energia prelevata è commisurata con quella necessaria a far compiere la tratta tra due stazioni successive. I brevi tempi di carica e di scarica rendono i supercondensatori particolarmente adatti a questo tipo di applicazione, [18].

Recupero di energia in impianti di sollevamento

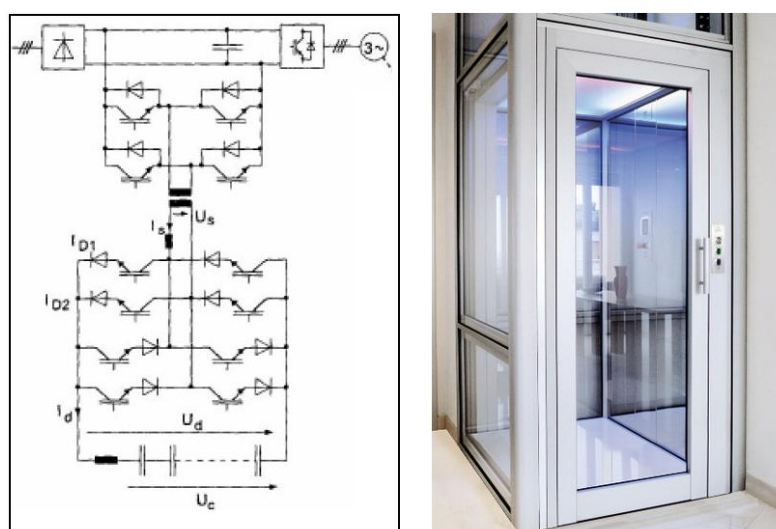


Figura 2.22 - Schema di sistema per il recupero di energia in impianti di sollevamento

In queste applicazioni l'elevata frequenza di accelerazioni e frenature rende di particolare interesse l'attuazione del recupero di energia potenziale durante la discesa delle cabine. La possibilità di deviare direttamente in rete la potenza in fase di frenatura, se da un lato consentirebbe il conseguimento in modo più immediato del recupero energetico, dall'altro non permetterebbe di attuare il cosiddetto "peak shaving" cioè non permetterebbe il contenimento dei picchi di potenza prelevati dalla rete e del "flicker" associato alle continue variazioni di tensione correlate appunto ai bruschi prelievi di potenza, [19]. Il contenimento dei disturbi correlati con le fluttuazioni di potenza può richiedere un sovradi-

mensionamento dell'impianto elettrico a monte del dispositivo. Un'ultima considerazione di tipo economico è rappresentata dal fatto che l'eventuale invio di energia in rete proprio per le modalità con cui è disponibile, sarebbe remunerato in maniera modesta.

Apparecchiature di diagnostica ospedaliera



Figura 2.23 - Apparecchiature di diagnostica ospedaliera

Molte apparecchiature di tipo radiologico sono caratterizzate da grossi assorbimenti di potenza nei brevi intervalli in cui viene effettuato l'esame sul paziente, intervallati da periodi ad assorbimento modesto. L'esame della costituzione di tali macchine pone in evidenza che spesso sono caratterizzate da uno stadio di ingresso c.a./c.c. che raddrizza la corrente alternata. Si potrebbe allora ipotizzare di inserire sul lato in corrente continua di tali apparecchiature dei moduli di supercondensatori idonei a contenere i picchi di potenza prelevati dalla rete e quindi ad evitare sovradimensionamenti degli impianti di alimentazione delle apparecchiature diagnostiche, resi necessari per consentire il regolare funzionamento delle apparecchiature alimentate dalla stessa rete. Tale sovradimensiona-

mento sarebbe poco economico visto il basso numero di ore di utilizzazione della potenza installata.

Un'ulteriore ipotesi da analizzare potrebbe essere quella di introdurre reti distributive in corrente continua invece che in corrente alternata col vantaggio di evitare lo stadio di conversione all'ingresso degli apparati diagnostici ed ottimizzare il dimensionamento delle batterie di supercondensatori asservendole a più apparecchiature diagnostiche. Anche se l'idea può essere di interesse, il discorso è tutto da approfondire sotto il profilo tecnico ed economico anche in considerazione del fatto che l'introduzione di una rete distributiva in corrente continua richiederebbe comunque una riprogettazione almeno parziale delle apparecchiature diagnostiche.

Applicazioni dei supercondensatori nella generazione distribuita

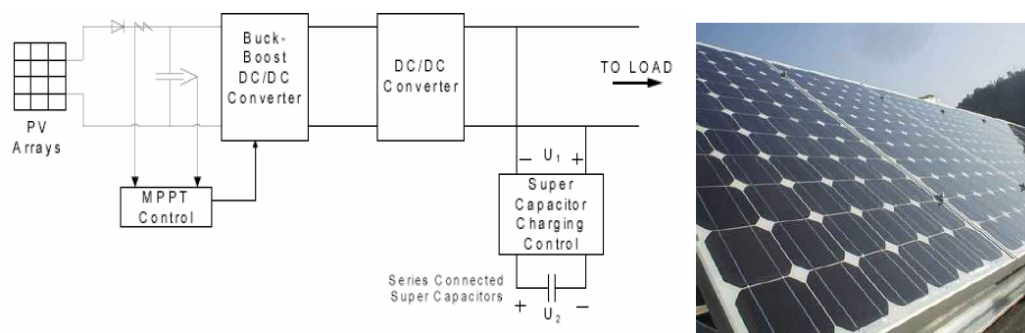


Figura 2.24 - Applicazione di supercondensatori in sistemi di generazione distribuita

Un argomento che attualmente sta riscuotendo un certo interesse è costituito dalla cosiddetta generazione distribuita, ossia dall'introduzione di piccoli sistemi di generazione ubicati in prossimità dell'utenza ed allacciati a reti in media e bassa tensione. Tra le diverse motivazioni che spingono in questa direzione assume importanza la possibilità di utilizzare a livello locale, fonti energetiche pulite

quali il sole ed il vento. Anche in questa applicazione l'introduzione dei supercondensatori sembra essere di interesse in relazione alla discontinuità delle fonti energetiche primarie. Ad esempio, l'abbinamento dei supercondensatori nella produzione di energia elettrica tramite turbine eoliche sembrerebbe essere attraente in quanto rinforzando la sbarra intermedia in corrente continua del sistema di generazione, durante i transitori, consentirebbe in particolare di livellare le rapide variazioni di potenza della turbina eolica, [20].

Compensazione della caduta di tensione in sistemi elettrici deboli



Figura 2.25 - Applicazione dei supercondensatori come stabilizzatori della tensione (*trolley busses*)

L'installazione di banchi di supercondensatori alla estremità delle linee di distribuzione deboli consente di compensare le cadute di tensione evitando l'introduzione di onerose stazioni di trasformazione. Tra le possibili applicazioni rientranti in questo campo, si possono citare: la stabilizzazione della tensione all'estremità di una linea di alimentazione per trolley-busses in fase di accelerazione del mezzo, la mitigazione degli abbassamenti di tensione nei sistemi di distribuzione in continua dei sottomarini o ai morsetti dei carichi nei sistemi di di-

istribuzione in corrente continua degli aeromobili a fronte dei crescenti assorbimenti di corrente nei moderni attuatori presenti.

Miglioramento della qualità della fornitura dell'energia elettrica

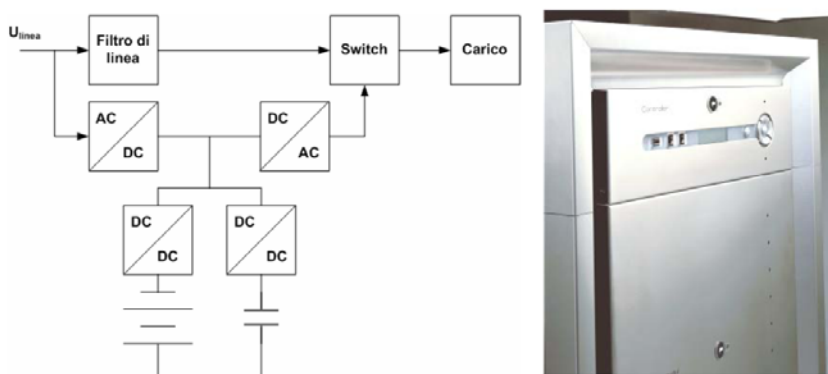


Figura 2.26 - Applicazione di supercondensatori per il miglioramento della fornitura di energia elettrica

L'introduzione di banchi di supercondensatori nella sezione in corrente continua dei gruppi di continuità risulta essere utile in alcune applicazioni particolari. L'abbinamento di batterie tradizionali con supercondensatori nei gruppi di continuità potrebbe essere infatti di interesse, ad esempio, in presenza di carichi con prelievi di potenza intermittenti caratterizzati da picchi di potenza di breve durata. Ancora una volta l'abbinamento delle batterie con i supercondensatori consentirebbe di ottimizzare l'utilizzo delle batterie senza essere costretti ad un loro sovradimensionamento per far fronte all'erogazione delle potenze richieste anche se per brevi intervalli di tempo. Più in generale l'uso dei supercondensatori abbinato ad opportuni convertitori potrebbe essere promettente in diverse apparecchiature atte a migliorare la qualità della potenza del sistema dove sono richieste iniezioni di potenza in brevi intervalli di tempo per consentire la continuità dell'alimentazione a fronte di buchi di tensione od interruzioni di breve

durata. Sono questi, infatti, disturbi presenti nelle reti elettriche che possono provocare l'arresto di interi processi produttivi con danni spesso ingenti e lunghi tempi di avviamento dell'impianto.

2.12 – Studio del collegamento in parallelo batteria elettrochimica – supercondensatore

Dopo aver analizzato i possibili impieghi di moduli di supercondensatori in ambito industriale, ci si è resi conto del fatto che tali dispositivi, pur essendo in grado di far fronte ad elevate potenze di picco, presentano una bassa densità di energia, tanto bassa da non poter essere utilizzati come veri e propri accumulatori di energia. Per questo motivo, in questo paragrafo, si vogliono analizzare i possibili collegamenti tra una batteria elettrochimica ed un modulo di supercondensatori. L'ibridazione di componenti tradizionali di accumulo di energia, permette di combinare infatti diversi modi per lo stoccaggio di energia in modo da utilizzare i vantaggi di ciascuno di essi ed in modo da compensarne gli svantaggi. L'ibridazione di una batteria chimica con un ultracapacitore può superare diversi problemi introdotti dai due componenti, come la bassa potenza specifica delle batterie e la bassa energia specifica degli ultracapacitori. In questo modo si è in grado di ottenere un accumulatore energetico innovativo con alta energia specifica ed alta potenza specifica, [21-22].

Fondamentalmente, lo stoccaggio di energia mediante la tecnologia ibrida si compone di due depositi di energia di base: il primo presenta alta energia specifica mentre il secondo, alta potenza specifica. Durante il funzionamento ad alta domanda di potenza, come per esempio nel caso di veicolo elettrico, nelle fasi di

accelerazione, entrambi i depositi di energia e potenza forniscono potenza al convertitore.

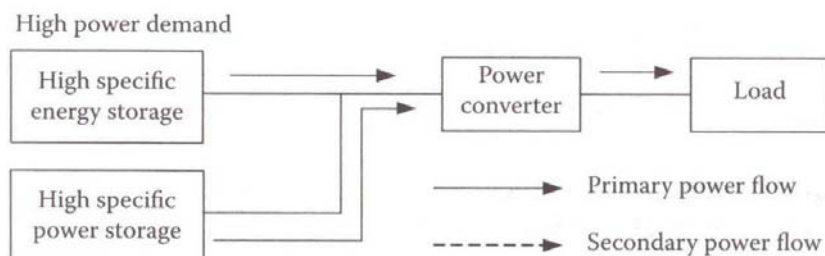


Figura 2.27 – Alta richiesta di Potenza

D'altra parte, quando si ha una richiesta di bassa potenza, come il funzionamento a regime, il flusso di energia primaria va ad alimentare il convertitore di potenza e contemporaneamente ricarica il deposito ad alta potenza specifica che è stata utilizzata precedentemente.

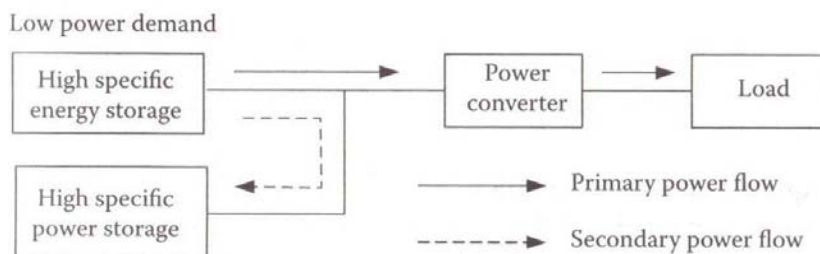


Figura 2.28 – Bassa richiesta di Potenza

Infine, durante una fase di frenata quando la richiesta di potenza risulta negativa, il picco di potenza sarà assorbito dal deposito ad alta potenza specifica e solo una parte limitata ricaricherà il deposito di energia specifica.

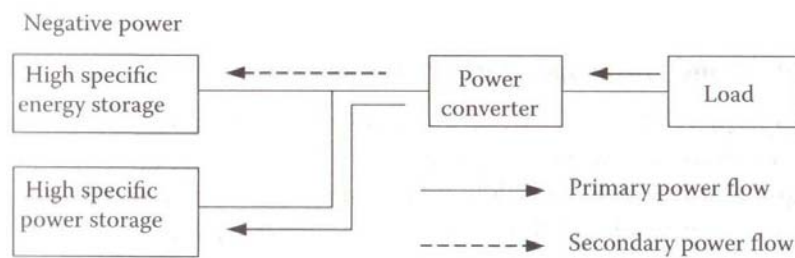


Figura 2.29 - Frenata rigenerativa

Mediante questa unione il sistema complessivo risulta essere molto più piccolo e molto più leggero rispetto alla situazione in cui i due accumuli di energia vengono utilizzati separatamente.

Come già accennato le tecnologie esistenti di accumulo di energia, escluso l'idrogeno, possono essere di tre tipi: batterie tradizionali, batterie ibride e batterie ibride con ultracapacitori. Quest'ultimo metodo risulta il più efficiente, in quanto l'ultracapacitore risulta in grado di offrire una potenza molto superiore rispetto alle batterie e può collaborare con varie batterie. Il modo più semplice per unire la batteria e l'ultracapacitore risulta quello di collegare direttamente e parallelamente l'ultracapacitore alle batterie, [23-24].

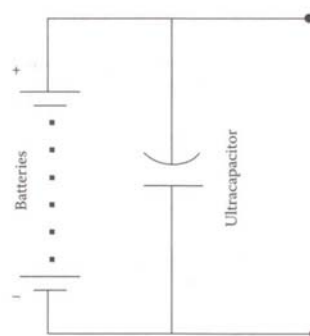


Figura 2.30 - Collegamento parallelo diretto

In questa configurazione l'ultracapacitore lavora semplicemente come un filtro di corrente, il quale risulta in grado di modificare significativamente il livello di corrente di picco delle batterie e ridurre la caduta di tensione della batteria come mostrato in Figura 2.31.

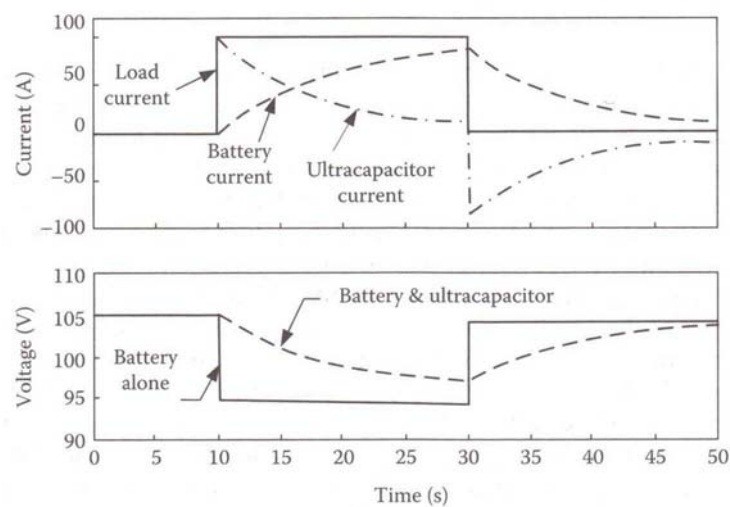


Figura 2.31 – Andamenti di Corrente e Tensione

Gli svantaggi principali di questa configurazione risultano essere principalmente due: il flusso di potenza non può essere controllato attivamente e l'energia dell'ultracapacitore non può essere completamente utilizzata.

In alternativa, risulta possibile come mostrato in Figura 2.32, collegare il pacco batterie all'ultracapacitore mediante l'utilizzo di un convertitore DC/DC a due quadranti, [25-27].

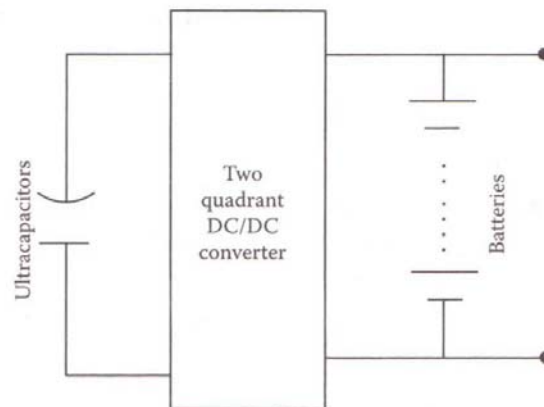


Figura 2.32 – Schema elettrico Ultracapacitore – Convertitore DC/DC – Pacco Batterie

Questo collegamento permette alle batterie e all'ultracapacitore di avere cadute di tensioni diverse. Inoltre, in questo modo, anche i flussi di potenza scambiati tra i componenti possono essere controllati attivamente e l'energia nell'ultracapacitore può essere utilizzata pienamente.

Il miglior progetto per l'accumulo di energia ibrida mediante l'utilizzo di una batteria ed un ultracapacitore risulta quando l'energia complessiva e la capacità di alimentazione riescono a soddisfare pienamente le esigenze di energia e potenza del veicolo, senza presentare ulteriori margini di scelta, [28-29]. L'energia immagazzinata e le esigenze di alimentazione del veicolo possono essere rappresentate mediante il coefficiente $R_{e/p}$ che risulta definito come il rapporto tra l'energia e la potenza richiesta dal veicolo, espresso solitamente in ore, secondo l'equazione 2.22.

$$R_{e/p} = \frac{E_r}{P_r} \quad (2.22)$$

Quando $R_{e/p}$ risulta noto, la batteria e l'ultracapacitore possono essere progettati in modo che il coefficiente $R_{e/p}$ risulti pari a:

$$R_{e/p} = \frac{E_r}{P_r} = \frac{W_b E_b + W_c E_c}{W_b P_b + W_c P_c} \quad (2.23)$$

dove W_b e W_c indicano rispettivamente il peso della batteria e del ultracapacitore, E_b e E_c indicano rispettivamente l'energia specifica della batteria e del ultracapacitore, P_b e P_c indicano rispettivamente la potenza specifica della batteria e del ultracapacitore.

L'equazione 2.23, può essere ulteriormente scritta sostituendo:

$$W_c = k \cdot W_b \quad (2.24)$$

dove $k = \frac{E_b - R_{e/p} \cdot P_b}{R_{e/p} \cdot P_c - E_c}$.

In questo modo, l'energia specifica immagazzinata e la potenza specifica risultano calcolabili mediante le seguenti equazioni.

$$E_{spec} = \frac{W_b E_b + W_c E_c}{W_b + W_c} = \frac{E_b + k E_c}{1 + k} \quad (2.25)$$

$$P_{spec} = \frac{W_b P_b + W_c P_c}{W_b + W_c} = \frac{P_b + k P_c}{1 + k} \quad (2.26)$$

Supponendo, a titolo di esempio, che un veicolo necessiti di 50 kW di potenza e che il rapporto energia/potenza sia $R_{e/p} = 0.07$ h, il che corrisponde a 3,5 kWh di energia, si possono calcolare i pesi necessari in base alla richiesta effettuata.

Le caratteristiche delle batterie e dell'ultracapacitore sono mostrati nelle tabelle seguenti.

CHPS (Batterie alternative)	E_{spec} [kWh]	P_{spec} [kW]	$R_{\frac{E}{P}}$ [h]
Lead-acid	28	75	0,2590
NiCd	50	120	0,2896
Ni-MH	64	140	0,3174
Li-I (CHPS)	100	1000	0,0694

Tabella 2.3 - Dati Batterie

Characteristic Data of a 42-V Ultracapacitor

Rated capacitance (DCC ^a , 25°C)	(F)	145
Capacitance tolerance	(%)	±20
Rated voltage	(V)	42
Surge voltage	(V)	50
Max. series resist., ESR (DCC, 25°C)	(mΩ)	10
Specific power density (42 V)	(W/kg)	2900
Max. current	(A)	600
Max. stored energy	(J)	128,000
Specific energy density (42 V)	(Wh/kg)	2.3
Max. leakage current (12 h, 25°C)	(mA)	30
Weight	(kg)	15
Volume	(l)	22
Operating temperature	(°C)	-35 to +65
Storage temperature	(°C)	-35 to +65
Lifetime (25°C)	(year)	10, C < 20% of initial value, ESR < 200% of initial value
Cyclability (25°C, I = 20 A)		500,000, C < 20% of initial value, ESR < 200% of initial value

^a DCC: discharging at constant current.

Tabella 2.4 - Dati Ultracapacitore

Confrontando i pesi richiesti dalla singola sorgente, dalle fonti ibride e quelli totali, radunati nella Tabella 2.5, risulta evidente come l'utilizzo degli ultracapacitori può ridurre notevolmente i pesi in gioco, soprattutto nel caso in cui si utilizzino una batteria che presenta una densità di potenza molto bassa, [30].

Characteristic Data of a 42-V Ultracapacitor

	Lead/Acid	Ni/Cd	Ni/MH	Li-I	Ultracap
Specific power (W/kg)	75	120	140	1000	2500
Specific energy (Wh/kg)	30	50	64	100	2
Total weight (kg)	667	417	357	50	1750

Characteristic Data of a 42-V Ultracapacitor

	Lead/Acid	Ni/Cd	Ni/MH	Li-I
Specific power (W/kg)	378.5	581.4	703	1222
Specific energy (Wh/kg)	26.5	40.7	49.2	85.5
Battery weight (kg)	116	69	54	35
Ultracap weight (kg)	16.5	16.7	16.9	6.05
Total weight (kg)	132	86	71	41

Tabella 2.5 – Pesi parziali e totali

Capitolo 3

Sistema di accumulo integrato batteria al litio – supercapacità

3.1 Trofeo Aria Nuova

I profili di velocità sperimentali, che successivamente verranno utilizzati come riferimenti durante le simulazioni numeriche, sono stati ricavati durante il 2° *TROFEO ARIA NUOVA*, competizione internazionale valevole per la FIA Alternative Energies CUP e per il Campionato Italiano Energie Alternative.



Figura 3.1 – Locandina Trofeo Aria Nuova

La finalità principe di questa manifestazione è stata la promozione e lo sviluppo dei veicoli ad energie alternative, di qualsiasi genere, purché a basso impatto ambientale. In armonia con la natura pionieristica dello sport dell'Automobile, l'utilizzazione delle energie alternative è stata negli anni testata attraverso la competizione sportiva, e per questa ragione, anche in questa manifestazione, si intendeva dimostrare al pubblico le prestazioni di questi veicoli e la loro funzionalità nell'uso quotidiano.

La manifestazione si compone di un Test di Regolarità, un Test di Consumo energetico e un Test di Emissioni e si articola in 4 prove. Tutte le prove hanno avuto luogo all'interno dell'Autodromo di Monza, utilizzando esclusivamente il circuito stradale della lunghezza di 5,793 km. Mentre per il test di Consumo Energetico è stata presa in considerazione tutta la distanza nominale percorsa dai veicoli nel corso delle 4 prove.

La distanza totale da percorrere risulta essere diversa a seconda della tipologia di veicoli in gara. Il numero di giri totali e le relative distanze vengono riassunte in Tabella 3.1.

Veicoli	Giri	Km	n° prove
<i>Ibridi ed Endotermici</i>	18	104,27	4
<i>Elettrici</i>	10	57,00	4

Tabella 3.1 – Numero di giri da percorrere in base alla tipologia di veicolo

Il percorso di gara, compiuto in senso orario, è stato diviso in tre differenti settori: tratta Urbana, extra Urbana ed Autostradale.

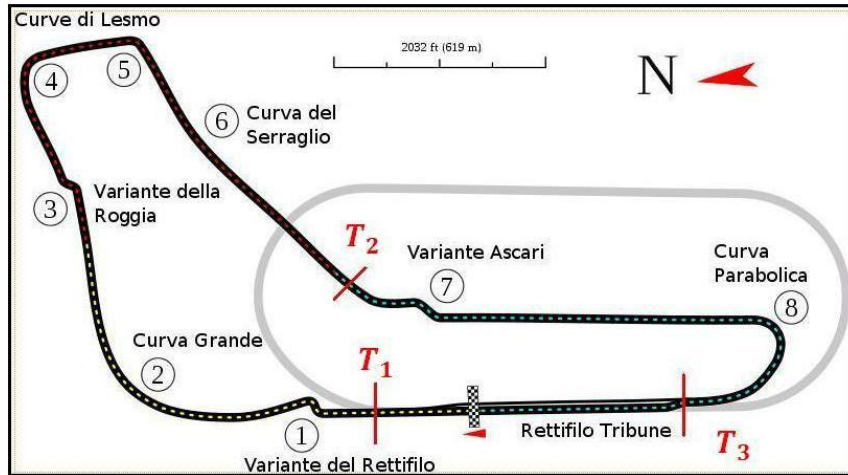


Figura 3.2 – Tracciato del circuito di Monza

Ogni settore presenta una velocità massima sostenibile in funzione della categoria di veicolo che si utilizza. Le velocità massime sono riportate nelle tabelle 3.2 e 3.3.

Tratta	Velocità MAX [km/h]
Tratta Urbana	50
Tratta extra urbana	90
Tratta autostradale	130

Tabella 3.2 - Veicoli cat. VII & VIII (Ibridi ed endotermici)

Tratta	Velocità MAX [km/h]
Tratta Urbana	35
Tratta extra urbana	75
Tratta autostradale	90

Tabella 3.3 - Veicoli cat. III & IIIA e IV (elettrici)

In entrambi i casi il tratto autostradale non poteva essere percorso ad una velocità inferiore ad 80 km/h. Si riportano in Figura 3.3 le velocità massime rilevate sperimentalmente e raggiunte durante le 4 gare disputate.

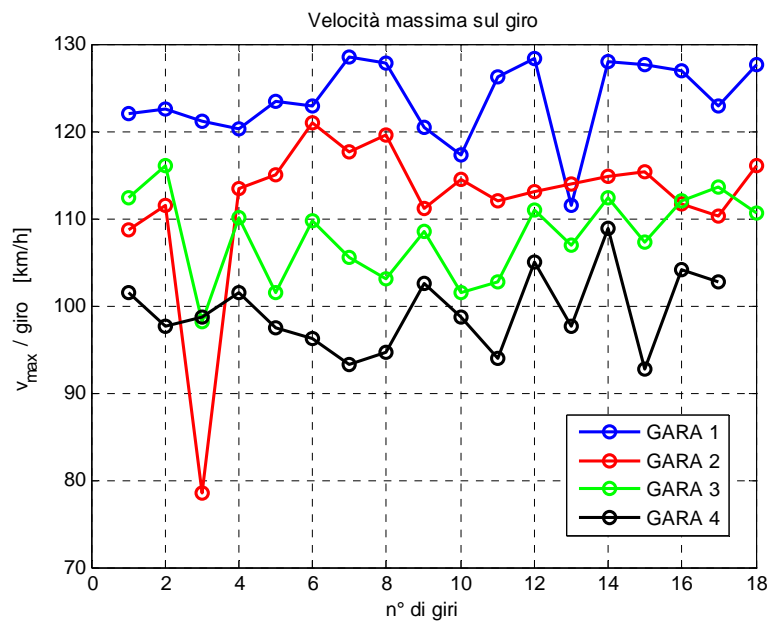


Figura 3.3 – Velocità massima raggiunta sul giro

- **Prova di regolarità**

Tutti i veicoli sono stati allestiti con un transponder, il che ha consentito la rilevazione della velocità utilizzando la telemetria del circuito, ed ha inoltre permesso di verificare che ciascun concorrente mantenesse la media oraria assegnata. Le velocità medie orarie vengono radunate nelle tabelle che seguono e risultano essere in funzione della categoria di veicolo utilizzato in gara.

Tratta	Lunghezza [km]	Velocità media [km/h]
Tratta Urbana	0,621	35
Tratta extra urbana	3,222	75
Tratta autostradale	1,957	105

Tabella 3.4 - Categoria VII & VIII

Tratta	Lunghezza [km]	Velocità media [km/h]
Tratta Urbana	0,621	35
Tratta extra urbana	3,222	75
Tratta autostradale	1,957	90

Tabella 3.5 - Categoria III & IIIA e IV

Il non rispetto delle regole comporta quindi una penalizzazione quantificata in un determinato punteggio, come mostrato in Tabella 3.6.

PENALITÀ - Test di Regolarità (R.T.)	Punti
Test di Regolarità (R.T.)	1 (fino a un massimo di 1000)
Ogni 1/100 di secondo di ritardo sul tempo ideale di passaggio	1 (fino a un massimo di 1000)
Non effettuare un Settore di Regolarità	Esclusione dalla classifica
Transito con un ritardo uguale o superiore a 20 minuti primi.	Esclusione dalla classifica
Non partecipare al Briefing di inizio gara	100
Ritardo superiore a 5' rispetto all'orario di partenza	Esclusione dalla classifica
Effettuare un Controllo o parte di esso in senso contrario	Esclusione dalla classifica
Effettuare un Controllo con aiuti esterni	Esclusione dalla classifica
Variare la configurazione del veicolo	Esclusione dalla classifica

Tabella 3.6 - Penalità Test di Regolarità

- **Prova di consumo**

I veicoli elettrici hanno dovuto effettuare la ricarica o la sostituzione rapida delle batterie, nei luoghi in cui l'operazione è stata prevista. Durante le ricariche, tra una manche e la successiva, sono stati misurati i consumi di energia, mentre a fine prova i veicoli elettrici non sono stati ricaricati. Quindi nella classifica dei consumi viene calcolata tutta l'energia contenuta nelle batterie ad inizio gara, più quella prelevata dalla rete per le ricariche.

Vengono quindi mostrati gli andamenti percentuali relativi all'utilizzo dell'energia in batteria sui singoli giri durante le diverse gare disputate.

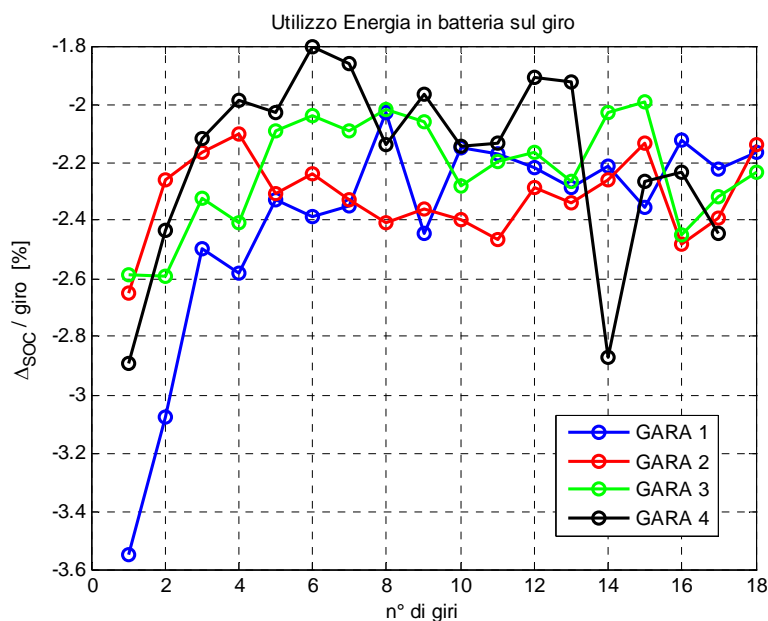


Figura 3.4 – Utilizzo Energia in Batteria (Sperimentale)

Tra una gara e la successiva vengono quindi ricaricate le batterie del veicolo, i dati relativi all'utilizzo percentuale della batteria sulle gare complete (18 giri) ed i relativi quantitativi percentuali di ricarica risultano radunati in Tabella 3.7.

GARA	Δ SOC [%]	Energia [Wh]	Ricarica [%]	Energia [Wh]
1	-43,14	-4788,65	25,84	2868,24
2	-41,71	-4629,48	36,89	4094,79
3	-40,12	-4453,43	31,31	3475,41
4	-39,45	-4378,84	-	-

Tabella 3.7 – Utilizzo Batteria e Ricarica (Sperimentale)

Come era logico aspettarsi i quantitativi di ricarica sono stati effettuati in modo da ottenere alla fine dell'ultima gara, il minimo quantitativo di energia elettrica compatibile con il modulo di batterie agli ioni di litio in uso.

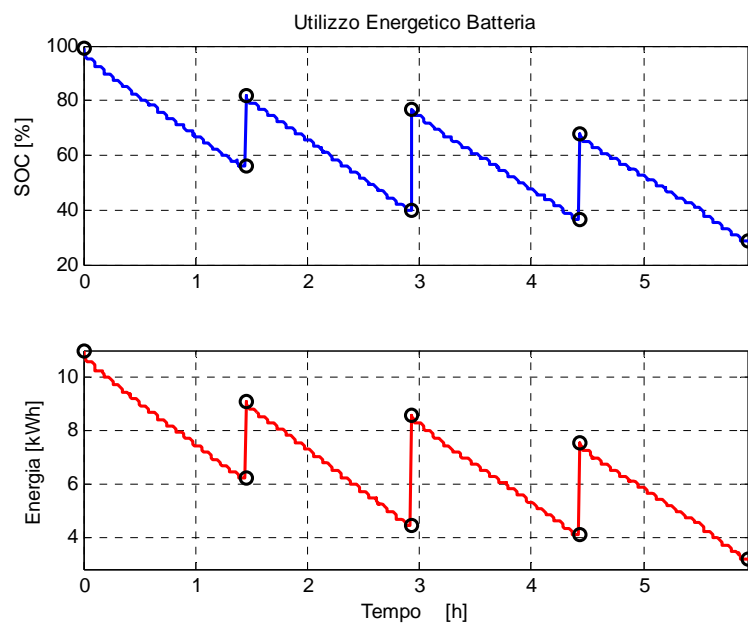


Figura 3.5 – Utilizzo Energetico in Batteria (Sperimentale)

Questa medesima logica di ricarica utilizzata in gara, verrà mantenuta anche durante le simulazioni numeriche effettuate con e senza l'ausilio dei supercondensatori.

Analogamente si è tenuto conto dei consumi di combustibile durante le singole gare.

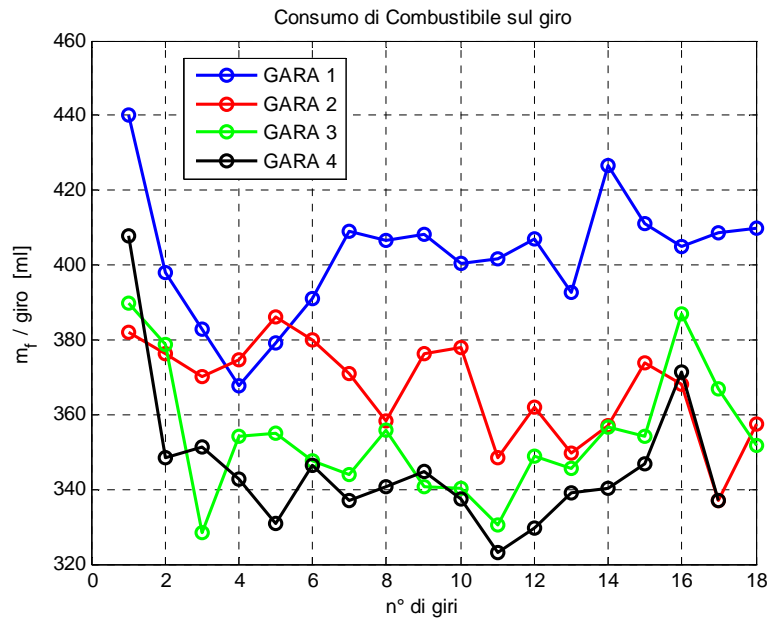


Figura 3.6 – Consumo di Combustibile (Sperimentale)

- **Rilevazione delle emissioni**

I controlli, riguardanti le emissioni di sostanze nocive a bordo del veicolo, sono stati effettuati con apposite apparecchiature fornite dal JRC [31]. Le verifiche delle emissioni, effettuate con le apparecchiature di tipo fisso, sono state eseguite durante il corso della manifestazione nella apposita area predisposta.

I monitoraggi hanno riguardato le seguenti emissioni:

- ✓ **CO₂** (per i veicoli elettrici e per quelli alimentati ad idrogeno viene considerata quella emessa dalla centrale di produzione dell'energia elettrica, utilizzando i parametri Europei conformi ai dati forniti dal JRC)
- ✓ **CO** - Monossido di Carbonio

- ✓ **HC** - Idrocarburi Incombusti
- ✓ **NOX** - Ossidi di Azoto

Dal momento che gli NOX sono ritenuti i più dannosi, nei punteggi essi sono calcolati con indice 2, ovvero al doppio rispetto agli altri parametri.

Il concorrente che presentava il minore valore dell'API , ossia l'indice di inquinazione atmosferica conseguiva il miglior risultato, [32]. I valori rilevati dalle apparecchiature, espressi in g/km, sono divisi per i valori degli standard EURO4 attualmente in vigore.

Per i veicoli alimentati con benzina, bioetanolo e combustibili gassosi:

$$(\text{HC} : 0,10) + 2 (\text{NO}_x : 0,08) + (\text{CO} : 1,0) \quad (3.1)$$

Per i veicoli alimentati con gasolio tipo bio diesel:

$$(\text{HC}+\text{Nox} : 0,30) + 2 (\text{NO}_x : 0,25) + (\text{CO} : 0,5) \quad (3.2)$$

Durante le simulazioni, non si è tenuto conto delle emissioni di sostanze nocive prodotte qual'ora si utilizzi il motore endotermico, si può solo immaginare che consumando meno carburante si potranno ottenere minori valori di emissioni durante le varie manovre.

3.2 Calcolo dei consumi energetici equivalenti

Mediante le acquisizioni eseguite durante le varie gare è stato possibile calcolare i consumi energetici equivalenti effettuati. Questi risulteranno successivamente utili per valutare gli effettivi benefici che si ottengono sostituendo al veicolo bimodale, dotato di batterie al litio, il sistema di accumulo energetico innovativo proposto.

La rilevazione del consumo energetico viene effettuata secondo la metodologia sotto riportata. Il sistema è applicabile a tutte le categorie di veicoli indipendentemente dal tipo di energia propulsiva utilizzata. I dati forniti da tale sistema non possono ritenersi di valore assoluto ma possono considerarsi sufficientemente attendibili per stabilire una scala di consumi. Per tutti i tipi di energia l'unità di misura del consumo viene espressa in kWh sulla base delle equivalenze (condivise dalla Comunità Scientifica) riportate sulla seguente Tabella 3.8.

	kcal/l	Wh/l	kcal/kg	Wh/kg	Approximate Value	
					Wh/kg	Wh/l
Petrol (Benz and A-75)	7.800	9.898,80	10.400	12.685,30	12.100	9.800
Motor benzol (pure)	8.400	9.769,20	9.600	11.164,80	11.200	9.770
Ethanol (15%)	8.200	9.647,60	8.500	7.811,60	7.700	6.800
Methyl alcohol 100%	3.600	4.186,80	4.500	5.233,50	5.300	4.200
Motor petrolium	8.200	9.536,80	-10.000	-11.850,00	12.700	9.540
Gas oil and Naphtha (Diesel Fuel)	8.500	9.885,50	-10.100	11.745,30	11.900	9.890
Biodiesel (B)						
	kcal/m ³	Wh/m ³	Wh/kg	Wh/Liter		
Methane	8.300	9.852,90	13.044	=====	13.000	
Propane-Butane (mix)	24.000	27.912	12.296	6.731	12.800	
LPG (GPL)	26.000	30.238	13.321			
Illuminating gas	3.800	4.419,40	6.905	=====	6.900	
Producer gas (gas generator)	1.000	1.163	1.011	=====	1.225	
	1.400	1.628,20	1.416			
Hydrogen	2.795	3.250,50	2.826,80	33.333	33.333	

(*) Gli indici verranno calcolati secondo i valori riscontrati nelle Verifiche Tecniche, variabili a seconda della tipologia e concentrazione del carburante Bio-Diesel effettivamente utilizzato

Tabella 3.8 – Coefficienti di Conversione

Nel caso in esame, dovendo convertire il quantitativo di carburante utilizzato da una FIAT Grande Punto 1.2, si è utilizzato un coefficiente di conversione pari a:

$$C_{l/Wh} = 8900 \text{ Wh/l} \quad (3.3)$$

L'equazione utilizzata per il calcolo del consumo energetico equivalente, ossia il coefficiente EEC espresso in Wh/kgkm, risulta essere composta da numerosi termini :

$$EEC = \frac{E_{tot} + \sum_i (\Delta SOC_i \cdot E_{bat}) + \sum_i E_{ric-i} + \sum_i (\Delta SOE_i \cdot E_{cap}) + \sum_i (C_{Wh/l} \cdot m_f)}{d \cdot m} \quad (3.4)$$

Dove :

E_{tot} = Energia totale disponibile ($E_{tot} = E_{batteria} + E_{SuperCap}$) espressa in Wh

ΔSOC_i = Consumo i-esimo di energia in batteria

E_{bat} = Energia iniziale in batteria espressa in Wh

E_{ric-i} = Ricarica di energia espressa in Wh

ΔSOE_i = Consumo i-esimo di energia nei supercondensatori

E_{cap} = Energia iniziale nei supercondensatori espressa in Wh

$C_{Wh/l}$ = Coefficiente di conversione

m_f = Consumo di carburante espresso in litri

d = Distanza percorsa in km

m = Massa totale autoveicolo in kg

3.3 Prototipo Bimodale

Il prototipo ibrido bimodale, utilizzato per partecipare al 2° TROFEO ARIA NUOVA, è stato realizzato presso il Politecnico di Milano, a partire da una Fiat Grande Punto 1.2 8v prodotta in serie. L'ibridizzazione della vettura è stata attuata tramite l'aggiunta, in maniera reversibile, di alcuni componenti elettrici e meccanici, atti a permettere la trazione nelle due modalità di funzionamento (elettrica ed endotermica).



Figura 3.7 – Prototipo Bimodale (Fiat Grande Punto 1.2)

Nel veicolo bimodale in esame, si è mantenuto il sistema propulsivo esistente e si è aggiunto un impianto di trazione elettrica a batteria in grado di garantire prestazioni decorose ed autonomie interessanti specificatamente per la circolazione in ambito urbano. L'aggiunta di questo apparato non influenza il comportamento e la struttura dell'impianto presente in origine sul veicolo che rimane sostanzialmente invariato. In questo modo, inoltre, il veicolo bimodale presenta trazione anteriore in tutte le modalità.

Gli elementi elettrici necessari a rendere ibrido un veicolo tradizionale sono:

1. Batteria di accumulatori
2. Inverter
3. Motore elettrico

Esistono poi degli elementi ausiliari che consentono il funzionamento dei tre oggetti fondamentali del sistema di trazione elettrica come, ad esempio, il dc/dc converter che mantiene carica la batteria a 12 V dell'automobile e alimenta i servizi ausiliari (luci, tergicristalli, alzacristalli etc. etc.) durante il funzionamento in modalità puro elettrico, il sistema di raffreddamento aggiuntivo per inverter e motore elettrico, ed il carica batteria per la ricarica della batteria di trazione dalla rete elettrica in autorimessa.

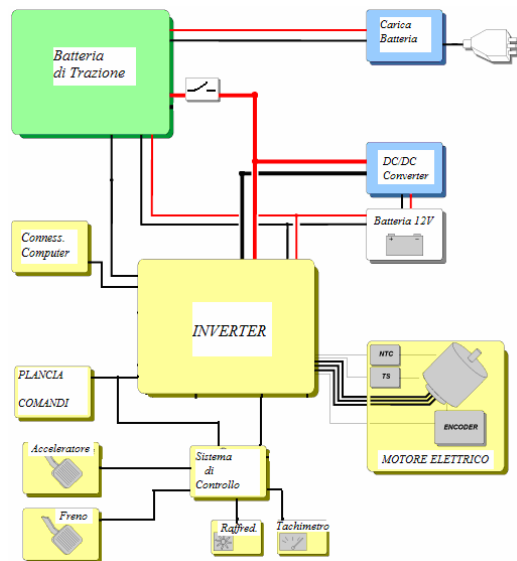


Figura 3.8 - Impianto di trazione elettrica

Nella Figura 3.8 si riporta uno schema a blocchi dettagliato di tutto l'impianto di trazione elettrica comprensivo degli organi ausiliari necessari al funzionamento nella modalità puramente elettrica.

Il prototipo in esame prevede a bordo una batteria al litio ThunderSky che offre la realizzazione del modulo di batterie con elettronica di controllo e di ricarica speciale ed inoltre presenta un peso ed un ingombro accettabili (circa 100 kg).

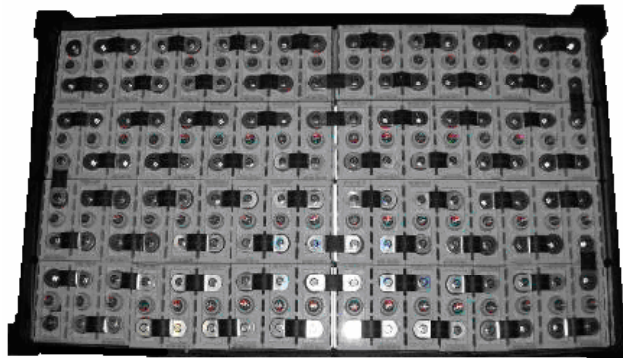


Figura 3.9 – Modulo di Batteria Ioni di litio (ThunderSky)

Come ampiamente spiegato nell'introduzione, l'obiettivo principe di questo lavoro di tesi prevede lo studio di un sistema di accumulo energetico innovativo, che produca dei benefici sia in termini di consumi che in termini di prestazioni rispetto al caso in cui si utilizzi solamente un modulo di batterie agli ioni di litio.

Per questo motivo viene presentato il dimensionamento completo del modulo di supercondensatori che successivamente verrà inserito, all'interno del simulatore numerico, in parallelo con la batteria agli ioni di litio per veicoli elettrici, e verranno analizzati i guadagni ottenuti rispetto alle prove disputate sul circuito dell'Autodromo di Monza, eseguite col prototipo bimodale dotato di batterie agli ioni di litio.

3.4 Dimensionamento dei supercondensatori in serie e parallelo

Il punto di partenza per il dimensionamento del banco di condensatori, una volta definita la sua architettura, risulta essere la conoscenza della potenza in ingresso nel supercondensatore [33]. Mediante l'integrazione della potenza nel tempo, risulta possibile determinare l'energia richiesta dall'azionamento al banco di supercondensatori, come mostrato nell'equazione 3.5.

$$Energia_{banco} = \int_{t_1}^{t_2} P(t) \cdot dt \quad (3.5)$$

I parametri principali da tenere in considerazione per la selezione dell'unità di accumulo sono:

- ✓ l'energia richiesta dall'azionamento [Wh]
- ✓ la tensione di esercizio [V]
- ✓ la corrente di esercizio [A]

Per garantire un buon funzionamento del convertitore DC/DC, per la gestione dei supercondensatori in termini di efficienza e di efficacia del controllo, è opportuno che la tensione operativa di massima carica del banco di supercondensatori sia non troppo distante dal valore della tensione del dc-link, un valore di circa $V_{max} = 160 V$ è stato ritenuto adeguato al caso in esame. I supercondensatori hanno un buon comportamento quando lo stato di carica è compreso fra 1 e 0.5, di conseguenza si ipotizza per il modulo di supercondensatori un valore di tensione minima pari a $V_{min} = 60 V$ nelle condizioni di massima scarica.

Si considera inoltre in questa analisi, come già accennato, il rendimento, del convertitore DC/DC bidirezionale, costante e pari a $\eta_{conv} = 0.95$.

Essendo la tensione massima del banco di supercondensatori pari a $V_{max} = 160 V$ ed avendo ultracapacitori con tensioni inferiori, si prevede l'utilizzo di diversi elementi da porre in serie, per raggiungere i desiderati valori di tensione.

Il numero di elementi da disporre in serie viene ricavato mediante l'equazione:

$$n_{serie} = \frac{V_{max}}{V_{nominale}} \quad (3.6)$$

Il circuito, costituito originariamente da n_{serie} ultracapacitori posti in serie, può essere ridotto, in prima approssimazione, ad un circuito equivalente avente valori di resistenza n_{serie} volte superiori al singolo blocco e capacità n_{serie} volte inferiore.

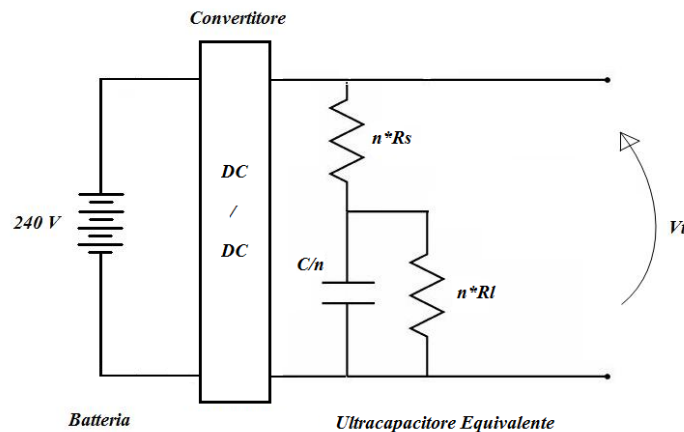


Figura 3.10 - Schema elettrico equivalente

Successivamente, dallo schema elettrico equivalente a cui ci si è ricondotti, si può calcolare la capacità totale, necessaria al banco di supercapacitori, mediante l'utilizzo dell'energia richiesta dal ciclo di lavoro, come:

$$C_{tot} = \frac{2 \cdot \text{Energia}_{banco}}{V_{max}^2 - V_{min}^2} \quad (3.7)$$

Il numero di blocchi di supercondensatori da porre in parallelo per ottenere il desiderato valore di capacità risulta quindi espresso dall'equazione 3.8.

$$n_{parallelo} = \frac{C_{tot}}{C_{unità}} \quad (3.8)$$

Infine, il numero totale di componenti da utilizzare risulta determinabile utilizzando l'equazione 3.9.

$$n_{tot} = n_{serie} \cdot n_{parallelo} \quad (3.9)$$

Al fine di effettuare un primo dimensionamento del banco di ultracapacitori, sono stati individuate alcune tipologie di ultracapacitori, forniti da *Maxwell Technologies* e *Ioxus Technologies* da collegare in serie e parallelo per soddisfare le specifiche in termini di tensione, corrente ed infine di capacità richieste.

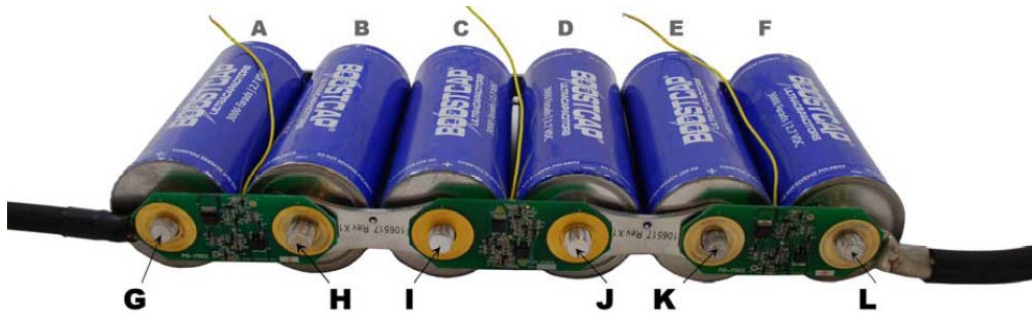


Figura 3.11 – Esempio di collegamento in serie

In Figura 3.11, vengono identificati, per mezzo di lettere maiuscole, i diversi poli dei singoli supercondensatori, collegati tra loro in serie.

I dati utilizzati per il dimensionamento, vengono raggruppati nelle tabelle seguenti.

BC ENERGY SERIES RADIAL D CELL		BCAP0350 E270 T11	BCAP0310 P270 T10
Tensione continua	[V]	2,7	2,7
Capacità nominale	[F]	350	310
Resistenza DC serie	[mΩ]	3,2	2,2
Potenza specifica (Vnominale)	[W/kg]	4300	6400
Energia specifica (Vnominale)	[Wh/kg]	5,62	5,06
Massima corrente continuativa	[A]	25	30
Corrente di dispersione	[mA]	0,3	0,45
Resistenza di dispersione	[Ω]	9000	6000
Temperatura minima di esercizio	[°C]	-40	-40
Temperatura massima di esercizio	[°C]	65	65
Peso (singolo elemento)	[kg]	0,063	0,062
Dimensioni Ø X L	[mm]	33 x 68,7	33 x 68,7

Tabella 3.9 – BC ENERGY SERIES RADIAL D CELL – Maxwell

K2 SERIES		BCA P0650 P270	BCA P1200 P270	BCA P1500 P270	BCA P2000 P270	BCA P3000 P270
Tensione continua	[V]	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Capacità nominale	[F]	650	1200	1500	2000	3000
Resistenza DC serie	[mΩ]	0,8	0,58	0,47	0,35	0,29
Potenza specifica (Vnominale)	[W/kg]	6800	5800	6600	6900	5900
Energia specifica (Vnominale)	[Wh/kg]	4,11	4,67	5,42	5,63	5,96
Massima corrente continuativa	[A]	62	81	97	123	147
Corrente di dispersione	[mA]	1,5	2,7	3	4,2	5,2
Resistenza di dispersione	[Ω]	1800	1000	900	642,86	519,23
Temperatura minima di esercizio	[°C]	-40	-40	-40	-40	-40
Temperatura massima di esercizio	[°C]	65	65	65	65	65
Peso (singolo elemento)	[kg]	0,16	0,26	0,28	0,36	0,51
Dimensioni Ø X L	[mm]	60 x 51,5	60 x 74	60 x 85	60 x 102	60 x 138

Tabella 3.10 – K2 SERIES – Maxwell

PRISMATIC SERIES - EDLC		RSC2R7108SP	RSC2R7208SP	RSC2R7308SP	RSC2R7508SP
Tensione continua	[V]	2,7	2,7	2,7	2,7
Capacità nominale	[F]	1000	2000	3000	5000
Resistenza DC serie	[mΩ]	0,6	0,6	0,36	0,25
Potenza specifica (Vnominale)	[W/kg]	15190	12300	11050	10850
Energia specifica (Vnominale)	[Wh/kg]	4,22	-	5,52	6,03
Massima corrente continuativa	[A]	-	-	-	-
Corrente di dispersione (72 h)	[mA]	2	5,5	5	6,5
Resistenza di dispersione	[Ω]	1350	490,91	540	415,38
Temperatura minima di esercizio	[°C]	-40	-40	-40	-40
Temperatura massima di esercizio	[°C]	65	65	65	65
Peso (singolo elemento)	[kg]	0,24	0,37	0,55	0,84
Dimensioni L x H x W	[mm]	36 x 94 x 64	36 x 150 x 64	51 x 150 x 64	80 x 150 x 64

Tabella 3.11 – PRISMATIC SERIES EDLC – Ioxus

Il numero di elementi da porre in serie risulta essere pari a 60 ed identico per ogni tipologia di supercondensatore scelto, in quanto presentano tutti la medesima tensione nominale. I dati inerenti alla scelta del supercapacitore considerato vengono presentati successivamente nel paragrafo 4.3.

Durante il dimensionamento del banco di supercondensatori, si è fatto riferimento in prima approssimazione ad un circuito elettrico equivalente avente valori di resistenze e capacità rispettivamente proporzionali ed inversamente proporzionali ai blocchi in serie considerati. Successivamente si è calcolata la funzione di trasferimento del banco di supercondensatori tra l'uscita V_t (tensione terminale del banco) e l'ingresso I (corrente in ingresso al banco) in modo da quantificare l'errore dovuto all'approssimazione compiuta.

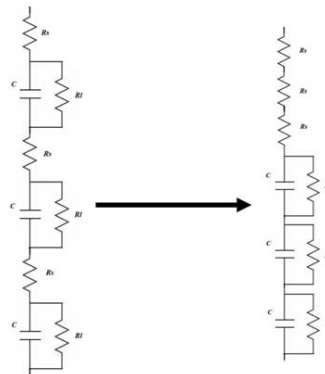


Figura 3.12 – Circuito elettrico equivalente

La funzione di trasferimento nel dominio di Laplace, così determinata, risulta espressa dall'equazione 3.10.

$$V_t/I = \frac{(n_{serie}R_lR_sC) \cdot s + n_{serie} \cdot (R_l + R_s)}{(R_lC) \cdot s + 1} \quad (3.10)$$

Mediante il modello numerico, realizzato con l'ausilio del linguaggio di programmazione MATLAB/Simulink[®], è stato possibile quantificare l'errore tra i due modelli matematici, che risulta essere inferiore allo 0.1 % .

3.5 Calcolo dei pesi e degli ingombri

Una volta noto il numero totale di elementi da porre in serie e/o in alternativa in parallelo per raggiungere i livelli di tensione e capacità richiesti, risulta utile effettuare il calcolo del peso del modulo completo di supercondensatori e successivamente quello relativo agli ingombri. Noto il peso del singolo componente, risulta immediato calcolare il peso complessivo del modulo di supercondensatori.

HC POWER SERIES	Massa [kg] - singolo elemento	Massa [kg] - banco completo
BCA P0005 P270	0,0023	0,138
BCA P0010 P270	0,0040	0,240
BCA P0025 P270	0,0072	0,432
BCA P0050 P270	0,0140	0,840
BCA P0100 P270	0,0250	1,500
BCA P0150 P270	0,0350	2,100
BC ENERGY SERIES RADIAL D CELL	Massa [kg] - singolo elemento	Massa [kg] - banco completo
BCAP0350 E270 T11	0,0630	3,780
BCAP0310 P270 T10	0,0620	3,720
K2 SERIES	Massa [kg] - singolo elemento	Massa [kg] - banco completo
BCA P0650 P270	0,1600	9,600
BCA P1200 P270	0,2600	15,600
BCA P1500 P270	0,2800	16,800
BCA P2000 P270	0,3600	21,600
BCA P3000 P270	0,5100	30,600
PRISMATIC SERIES - EDLC	Massa [kg] - singolo elemento	Massa [kg] - banco completo
RSC2R7108SP	0,2400	14,400
RSC2R7208SP	0,3700	22,200
RSC2R7308SP	0,5500	33,000
RSC2R7508SP	0,8400	50,400

Tabella 3.12 – Peso del banco di Ultracapacitori

Come era logico aspettarsi il peso del singolo elemento considerato risulta aumentare in funzione della propria capacità C. Al contrario, il numero di elementi da porre in serie, dipendendo dal rapporto tra la tensione del singolo elemento e quella massima totale del modulo completo, risulta il medesimo per ogni supercondensatore considerato. Quindi il peso complessivo del modulo di supercondensatori dipende esclusivamente dal valore di capacità richiesto.

Analogamente a quanto detto precedentemente, noto il numero di elementi totali, costituenti il banco di supercapacitori, risulta possibile determinare gli ingombri totali relativi. Dovendo disporre 60 elementi, si decide di ricreare un modulo di ultracapacitori, formato da 6 file e ciascuna composta da 10 supercondensatori.

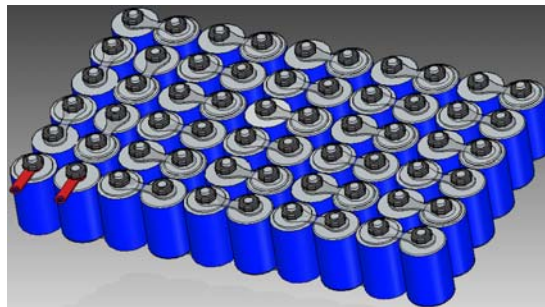


Figura 3.13 – Pacco di Supercondensatori

I dati relativi agli ingombri calcolati, vengono raggruppati in Tabella 3.13 a seconda della tipologia di supercondensatore analizzato. Si ricorda inoltre che i dati relativi agli ingombri ed inerenti alla scelta del supercapacitore considerato vengono presentati nel paragrafo 4.3.

HC POWER SERIES	Dimensioni - Ø X L - [mm]	Volume [dm ³]
BCA P0005 P270	10 x 20	0,120
BCA P0010 P270	10 x 30	0,180
BCA P0025 P270	16 x 26	0,339
BCA P0050 P270	18 x 41	0,797
BCA P0100 P270	22 x 45	1,307
BCA P0150 P270	25 x 50	1,875
BC ENERGY SERIES RADIAL D CELL	Dimensioni - Ø X L - [mm]	Volume [dm ³]
BCAP0350 E270 T11	33 x 68.7	4,489
BCAP0310 P270 T10	33 x 68.7	4,489
K2 SERIES	Dimensioni - Ø X L - [mm]	Volume [dm ³]
BCA P0650 P270	60 x 51,5	11,124
BCA P1200 P270	60 x 74	15,984
BCA P1500 P270	60 x 85	18,360
BCA P2000 P270	60 x 102	22,032
BCA P3000 P270	60 x 138	29,808
PRISMATIC SERIES - EDLC	Dimensioni - L x W x H - [mm]	Volume [dm ³]
RSC2R7108SP	36 x 94 x 64	12,995
RSC2R7208SP	36 x 150 x 64	20,736
RSC2R7308SP	51 x 150 x 64	29,376
RSC2R7508SP	80 x 150 x 64	46,080

Tabella 3.13 – Ingombri Supercapacitori

Capitolo 4

Strategia di controllo del sistema di accumulo ed implementazione nel simulatore numerico

4.1 Introduzione

Dovendo analizzare le problematiche legate all'utilizzo dei supercondensatori in parallelo con due diverse tipologie di batterie per veicoli elettrici, al fine di valutarne pregi e difetti in termini di prestazioni e consumi energetici, si è deciso di utilizzare il simulatore numerico, in parte precedentemente realizzato, di una Fiat Grande Punto 1.2 e di modificare il modello di batteria, il gestore di bordo ed altri componenti ausiliari, in modo da comprendere anche il modulo, opportunamente dimensionato, di ultracapacitori.



Simulatore Fiat Grande Punto 1.2 8v ibrido-bimodale

Figura 4.1 - Simulatore numerico

Risulta utile ricordare che il simulatore fa uso di numerosi dati caratteristici, tra cui anche le mappature del motore endotermico, della batteria ed i dati relativi agli ultracapacitori, memorizzati sotto forma di file con estensione .mat, per questa ragione, prima di lanciare una qualsiasi simulazione, è necessario avviare il programma 'mat_parametri_GP_ibrido.m', funzione che, automaticamente, carica sul workspace di MATLAB[®] [34], sotto forma di variabili, tutti i dati necessari.

In Figura 4.2 viene rappresentato lo schema a blocchi complessivo del modello utilizzato, questo risulta essere il grado di modellazione più superficiale, che permette tuttavia di riconoscere tutte le componenti principali e di visualizzare i flussi di potenza.

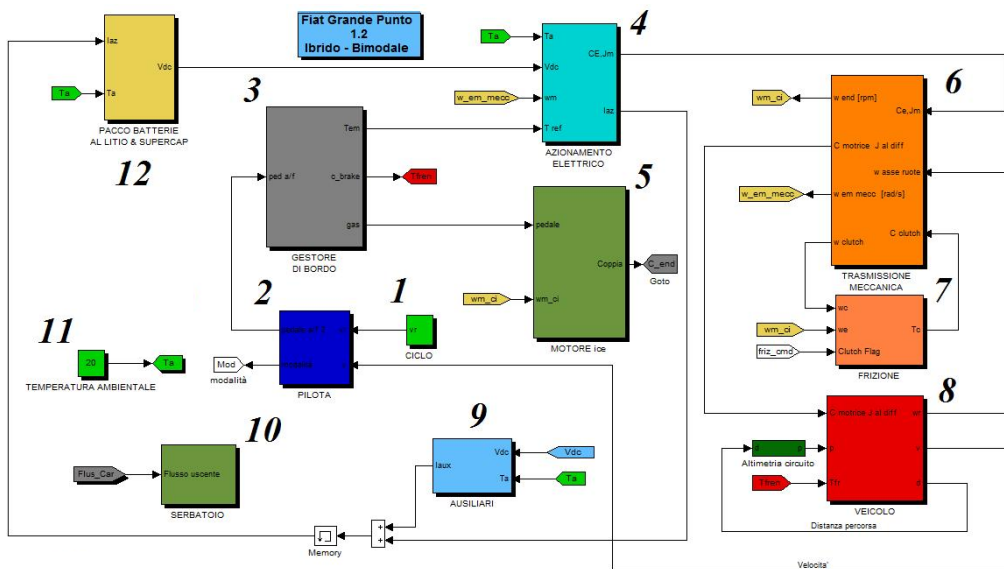


Figura 4.2 – Macroblocchi principali

Ogni blocco contiene al suo interno il sottomodulo rappresentante l'organo, meccanico o elettrico, effettivamente presente sul prototipo bimodale ad eccezione del modulo di supercondensatori.

Legenda

1. Ciclo
2. Pilota
3. Gestore di bordo
4. Azionamento elettrico
5. Motore endotermico
6. Trasmissione meccanica
7. Frizione
8. Veicolo
9. Servizi Ausiliari
10. Serbatoio
11. Modello Termico
12. Modulo Energetico innovativo (Batteria ed Ultracapacitori)

4.2 Il simulatore numerico

Successivamente, verranno illustrati i diversi blocchi costituenti il simulatore numerico, essendo questo argomento, parte integrante di tesi precedenti [35-36], in questa sede verranno illustrati in generale tutti i singoli componenti, utili alla comprensione globale del simulatore, mentre verrà prestata particolare attenzione qual'ora ci siano state delle sostanziali modifiche.

4.2.1 Sottomodello CICLO

Mediante il sottomodulo ciclo risulta possibile selezionare il profilo di velocità richiesto al simulatore. In particolare, mediante l'ausilio di un menu di scelta, si possono selezionare i quattro profili di velocità, ricavati sperimentalmente, nelle rispettive gare disputate sul circuito di Monza.

4.2.2 Sottomodulo PILOTA

All'interno del sottomodulo pilota è presente un sistema di controllo della dinamica longitudinale, in grado di svolgere un'attività paragonabile a quella umana. In particolare, il sistema di controllo deve essere in grado di reagire all'evolvere dello stato del veicolo regolando il segnale dell'acceleratore ed azionando all'occorrenza i freni meccanici. Quest'attività di controllo è svolta in più blocchi del modello, ma il sottomodulo pilota risulta essere il blocco princi-

pale, avendo la funzione di controllare l'inseguimento del riferimento di velocità proveniente dal blocco ciclo. Questa azione di controllo è esercitata mediante un controllo PID (proporzionale – integrale – derivativo), leggero da un punto di vista computazionale, ma affidabile e sicuramente adeguato allo scopo per cui è impiegato. Il controllore, di tipo PID, riceve in entrata un segnale pari alla differenza fra la velocità di riferimento e la velocità reale del veicolo e mediante degli opportuni guadagni, esso restituisce un segnale di uscita proporzionale al valore in ingresso ed eventualmente, alla sua derivata ed al suo integrale. Questa logica è paragonabile al comportamento di un ipotetico guidatore, il quale accelera quando l'auto viaggia ad una velocità inferiore a quella voluta e frena quando la velocità del veicolo è troppo superiore a quella desiderata.

$$\text{pedale}(s) = \left(k_p + k_d \cdot s + \frac{k_i}{s} \right) (v_{\text{rif}}(s) - v_{\text{reale}}(s)) \quad (4.1)$$

Il valore di risposta calcolato dal controllore PID può essere considerato come un segnale di comando dell'acceleratore, nel caso in cui esso risulti positivo, oppure come comando del freno, se negativo. Inoltre, al fine di simulare il segnale proveniente dal pedale dell'acceleratore, il segnale viene espresso in percentuale e quindi saturato superiormente in modo da non superare mai il 100% della corsa del pedale. Inferiormente, il segnale non presenta alcuna limitazione, poiché, per valori negativi, esso simula l'azione sul pedale del freno, proporzionale alla forza esercitata dal guidatore. In questo caso, quindi, il segnale non è espresso sotto forma di percentuale di ammissione, ma rappresenta l'effettiva coppia frenante.

Il blocco pilota risulta parzialmente modificato rispetto alla versione precedente. In particolare, è stato ritenuto opportuno modificare il precedente sistema di

controllo che prevedeva l'utilizzo dei medesimi parametri di controllo sia nel caso di funzionamento dell'azionamento elettrico che nel caso endotermico e di sostituirlo con un controllo adattivo. Con il termine *controllo adattativo* si fa riferimento a leggi di controllo che in modo autonomo modificano i propri parametri per adattarsi alle modifiche che il sistema può subire durante l'esercizio delle sue funzioni, [37-38]. Nel caso in esame, si è pensato di utilizzare un *controllo adattativo in feedforward*: si sono identificati e tabulati due differenti guadagni che vengono attribuiti al controllore qualora sia in funzione il motore elettrico piuttosto che quello endotermico. Questa modifica è stata necessaria in quanto il segnale di velocità analizzato sperimentalmente ed utilizzato come segnale di riferimento nel simulatore, presenta notevoli disturbi, in particolare durante la marcia in elettrico puro. Inoltre, applicando varie tipologie di filtri al segnale di velocità, si introducono nel simulatore dei ritardi che portano a non determinare correttamente i parametri di interesse del veicolo. Per questi motivi, si è ritenuto opportuno, attribuire due differenti guadagni al controllore qualora si utilizzi il motore elettrico piuttosto che quello endotermico in modo da non produrre notevoli oscillazioni nel sistema ma allo stesso tempo in modo da garantire l'inseguimento di velocità desiderato.

Modalità	Kp	Kd	ki
<i>Elettrica</i>	200	0	0
<i>Endotermica</i>	400	0	0

Tabella 4.1 – Valori dei guadagni utilizzati dal controllo

Nel medesimo sottomodello sono presenti inoltre: il blocco di selezione della modalità elettrico, endotermico, start&stop ed il blocco relativo alla scelta del tipo di ricarica in frenata desiderata (minima, massima). Questo secondo tasto di scelta è stato introdotto in quanto in un primo momento si è voluto validare il modello modificato, verificando che il simulatore ricostruisse correttamente i parametri di interesse di tutti gli organi del veicolo bimodale mentre in un se-

condo momento è stato necessario poter recuperare in frenata il massimo dell'energia disponibile ed immagazzinabile al fine di sfruttare al massimo i supercondensatori. In questo modo nel primo caso, risulta possibile recuperare in frenata la medesima quantità di energia recuperata dalla vettura durante la gara svolta col prototipo bimodale e quindi validare la bontà del modello. Al contrario, nel secondo caso, il recupero in frenata risulta il più elevato possibile, compatibilmente con i limiti di ricarica imposti dalla batteria e coi limiti fisici imposti dall'inverter, al fine di poter sfruttare maggiormente il modulo di supercondensatori.

4.2.3 Azionamento elettrico

Il blocco azionamento è composto da due sottomodelli distinti: quello relativo al motore elettrico, asincrono trifase, e quello rappresentante l'inverter, per l'alimentazione ed il controllo del motore elettrico. Il modello del motore elettrico deve essere in grado di valutare corrente e tensione assorbita dall'inverter nota la coppia richiesta e il regime di rotazione. Per valutare tali grandezze, il motore viene rappresentato con il modello a parametri concentrati come riportato in Figura 4.3.

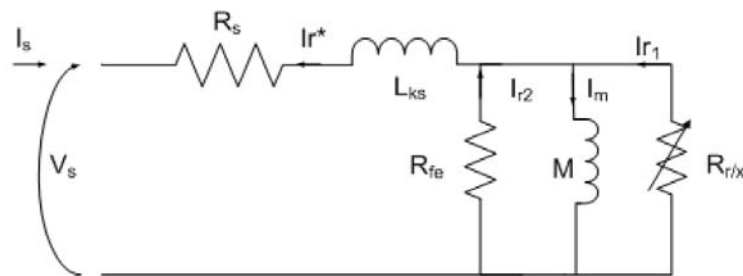


Figura 4.3 – Circuito equivalente

A differenza dei modelli a 4 parametri generalmente riportati in letteratura, in questo caso è stata considerata una resistenza aggiuntiva che rappresenta le perdite nel ferro. Nota la coppia e il regime di rotazione, è possibile calcolare tensione e corrente di statore risolvendo il circuito equivalente. Bisogna mettere in evidenza la logica di controllo del motore ad induzione nella zona a campo indebolito: per valori di pulsazione meccanica superiori a quella nominale viene ridotto il flusso magnetico in maniera inversamente proporzionale al regime di rotazione del motore, in questo modo la tensione tende a crescere finché l'inverter non riesce più ad erogare quella tensione perché l'indice di modulazione tende al suo limite fisico pari ad uno. A questo punto il flusso viene ulteriormente ridotto da un controllo esterno al blocco del motore che garantisce un indice di modulazione non superiore al suo limite. Infine, un ulteriore controllo esterno limita la coppia richiesta all'azionamento per evitare che la corrente assorbita dalla batteria sia superiore alla massima consentita.

Si riporta il campo di operatività del motore elettrico modellizzato con le relative curve di isorendimento.

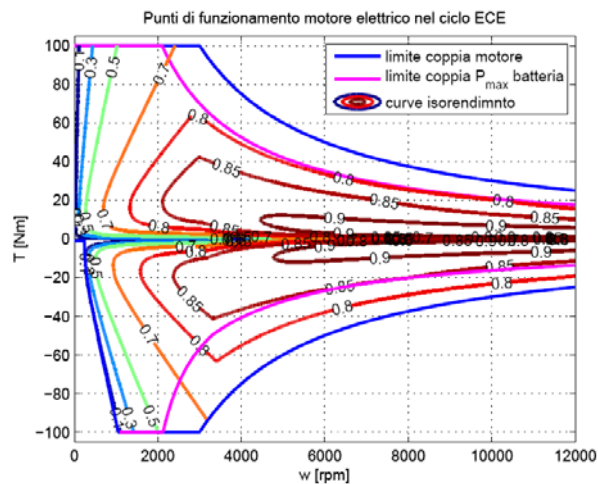


Figura 4.4 – Caratteristica EM

Vengono infine mostrate le principali equazioni necessarie a risolvere il circuito equivalente, [39]. Come prima cosa l'algoritmo presente nel modello valuta il flusso magnetico al traferro (4.2) :

$$\psi_r = |M \cdot I_m| \quad (4.2)$$

dove la corrente di magnetizzazione è definita dalla equazione 4.3.

$$\begin{cases} I_m = I_{mn} & \Omega \leq \Omega_n \\ I_m = I_{mn} \frac{\Omega}{\Omega_n} & \Omega > \Omega_n \end{cases} \quad (4.3)$$

Noto il flusso, la coppia richiesta T e il numero di coppie polari del motore n, è possibile calcolare il fasore corrente rotorica, mediante l'equazione :

$$\bar{I}_{r1} = -j \frac{T}{3n \cdot \bar{\psi}_r} \quad (4.4)$$

Conoscendo il regime di rotazione del motore si può ricavare la pulsazione elettrica con un semplice bilancio energetico e di conseguenza la forza elettromotrice indotta.

$$\omega_{el} = n \cdot \frac{T \cdot \Omega + 3R_r |\bar{I}_{r1}|^2}{T} \quad (4.5)$$

$$\bar{E} = j \cdot \omega_{el} \cdot \bar{\psi}_r \quad (4.6)$$

Dopo aver calcolato le perdite nel ferro con il sistema di equazioni 4.7, si procede con il valutare la corrente che nel modello rappresenta tali perdite mediante l'equazione 4.8.

$$\begin{cases} P_{fe} = P_{fen} \frac{\Omega}{\Omega_n} & \Omega \leq \Omega_n \\ P_{fe} = P_{fen} \frac{\Omega_n}{\Omega} & \Omega > \Omega_n \end{cases} \quad (4.7)$$

$$I_{r2} = - \left| \frac{P_{fen}}{3 \cdot E} \right| \quad (4.8)$$

Applicando la legge ai nodi di Kirchhoff alla rete di Figura 4.3 si può calcolare la corrente storica :

$$I_s = -I_{r1} - I_{r2} + I_m \quad (4.9)$$

Infine, facendo riferimento al diagramma fasoriale di Figura 4.5 si può calcolare anche la tensione storica mediante l'equazione 4.10.

$$|V_s| = |\bar{E} + R_s \cdot \bar{I}_s + j\omega_{el}L_{ks}\bar{I}_s| \quad (4.10)$$

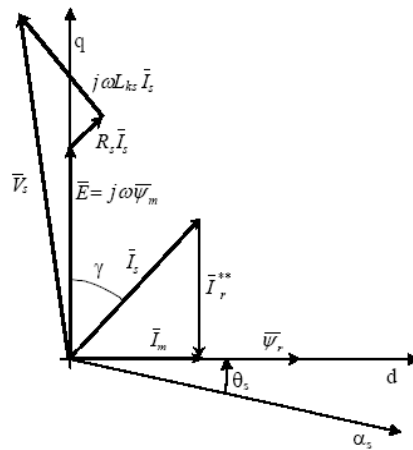


Figura 4.5 – Diagramma fasoriale

Il modello dell'azionamento elettrico non è stato modificato, rispetto alla versione precedente, l'unica variazione effettuata riguarda la logica di funzionamento. Infatti, nel precedente modello il motore elettrico veniva automaticamente spento qual'ora venisse inserito il motore endotermico. Nel modello in esame, è stato inserito un comando logico proveniente dal gestore di bordo (denominato *com_off*) che permette l'accensione del motore elettrico anche quando risulta in funzione il motore a combustione interna. In questo modo, risulta possibile gestire l'energia contenuta nel banco di supercondensatori in modo da fornire potenza all'azionamento elettrico e conseguentemente diminuire l'utilizzo di quello endotermico.

L'inverter utilizzato nel modello dell'azionamento elettrico risulta principalmente costituito da transistor IGBT e diodi. Lo schema elettrico dell'inverter viene mostrato in Figura 4.6.

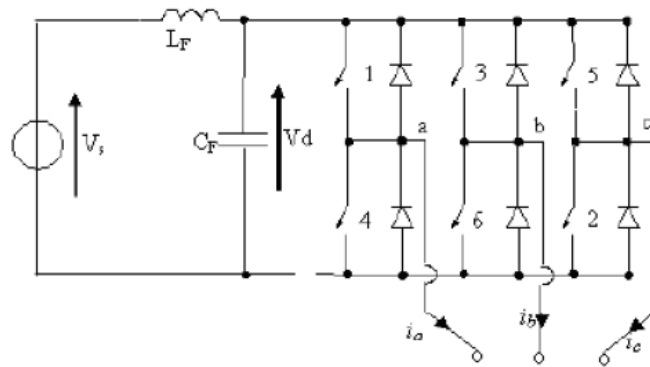


Figura 4.6 – Circuito elettrico Inverter

Nel sottomodulo rappresentante il convertitore viene calcolata la potenza persa per conduzione nei transistor IGBT e nei diodi mediante le equazioni (4.11) oltre alla potenza persa per commutazione, sempre nei IGBT_s e nei diodi mediante invece le equazioni (4.12).

$$P_{fwT} = \frac{1}{2} \left(\frac{A_{fwT}}{\pi} \cdot I_{Max} + \frac{B_{fwT}}{4} \cdot I_{Max}^2 \right) + m \cdot \cos\varphi \cdot \left(\frac{A_{fwT}}{8} \cdot I_{Max} + \frac{B_{fwT}}{3\pi} \cdot I_{Max}^2 \right)$$

$$P_{fwD} = \frac{1}{2} \left(\frac{A_{fwD}}{\pi} \cdot I_{Max} + \frac{B_{fwD}}{4} \cdot I_{Max}^2 \right) + m \cdot \cos\varphi \cdot \left(\frac{A_{fwD}}{8} \cdot I_{Max} + \frac{B_{fwD}}{3\pi} \cdot I_{Max}^2 \right)$$

(4.11)

$$P_{comT} = f_s \cdot I_{Max} \left(\frac{B_{onT}}{\pi} + \frac{C_{onT}}{4} \cdot I_{Max}^2 \right) + f_s \cdot I_{Max} \cdot \left(\frac{B_{offT}}{\pi} + \frac{C_{offT}}{4} \cdot I_{Max}^2 \right)$$

$$P_{comD} = f_s \cdot I_{Max} \left(\frac{B_{recD}}{\pi} + \frac{C_{recD}}{4} \cdot I_{Max}^2 \right)$$

(4.12)

Il modello riceve quindi in ingresso la corrente e la tensione assorbita dal motore e fornisce in output la corrente e la tensione continua richiesta alla batteria, oltre alla potenza persa.

Vengono presentati nelle seguenti Tabelle i dati di targa degli elementi precedentemente modellizzati.

Motore elettrico ad induzione		
Potenza nominale	kW	10
Coppia nominale	Nm	34
Coppia massima	Nm	100
Tensione nominale concatenata	V	100
Coppie polari	-	2
Corrente di magnetizzazione	A	33,61
Pulsazione nominale meccanica	rad/s	600
Pulsazione base meccanica	rad/s	314

Tabella 4.2 – Dati di targa Motore elettrico

Inverter		
Peso	kg	7,5
Corrente nominale in uscita	A	236 Arms
Corrente massima in uscita	A	350 Arms
Tensione in ingresso	V	80 – 400 Vdc
Tensione della logica	V	12 Vdc
Frequenza di commutazione	kHz	3 – 9
Raffreddamento	-	liquido
Temperatura di esercizio minima	°C	-20
Temperatura di esercizio massima	°C	65
Tipo di controllo	-	Vettoriale
Modulazione	-	PWM
Isolamento	-	IP54
Interfaccia di comunicazione	-	CAN BUS

Tabella 4.3 – Dati di targa Inverter

4.2.4 Motore endotermico

Come illustrato in Figura 4.7 i relativi consumi ed il comportamento del motore endotermico (1200 cm³, FIAT) vengono riprodotti tramite mappature ricavate sperimentalmente.

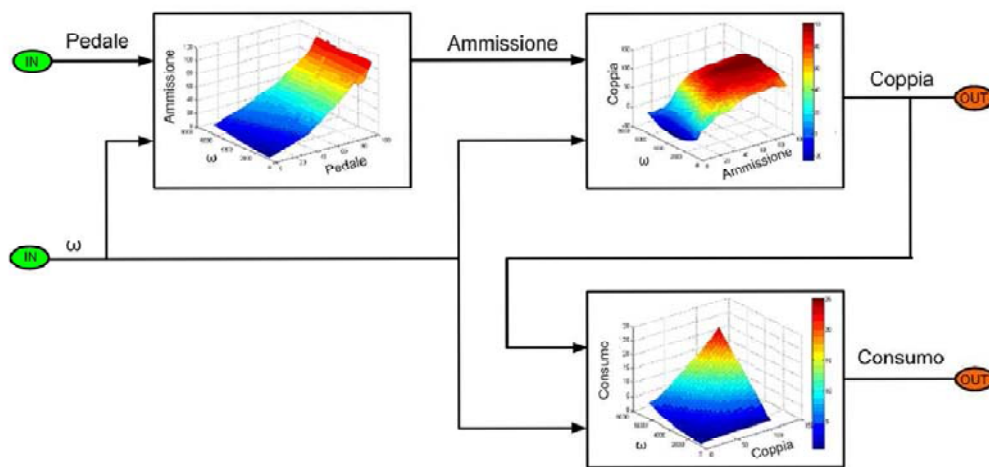


Figura 4.7 – Mappe motore endotermico

- 1) La prima mappa rappresenta la legge che lega l'apertura della farfalla in base al regime di rotazione e al comando del acceleratore.
- 2) La seconda mappatura viene usata per riprodurre la coppia del propulsore in funzione dell'apertura farfalla e del regime di rotazione.
- 3) Mentre la terza mappa permette di valutare il consumo di combustibile in base al regime di rotazione ed alla coppia erogata.

Il blocco rappresentante il motore endotermico riceve in input la coppia di riferimento proveniente dal gestore di bordo ed il regime di rotazione calcolato dall'integrazione della dinamica longitudinale del veicolo, mentre fornisce in output la coppia effettiva del motore e il consumo di carburante.

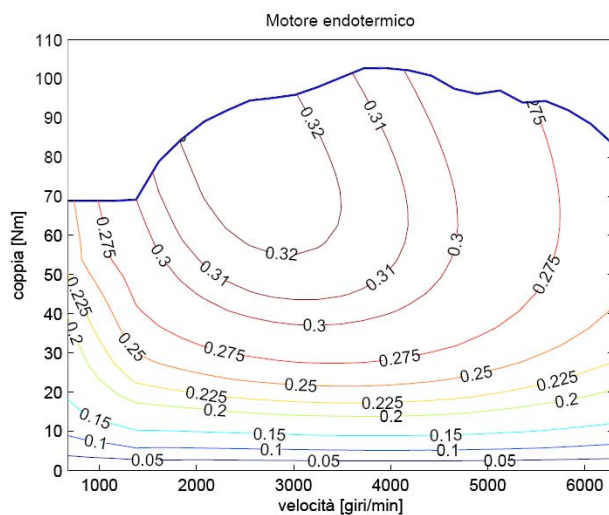


Figura 4.8 – Mappa motore endotermico

I dati relativi al motore a combustione interna modellizzato nel simulatore, vengono raggruppati in Tabella 4.4.

Motore combustione interna		
Numero cilindri in linea trasversale anteriore	-	4
Alesaggio x corsa	mm	70,8 x 78,9
Cilindrata	cm ³	1242
Potenza max (5500 rpm)	kW	48
Coppia massima all'albero (3000 rpm)	Nm	100
Livello ecologico	-	EURO 4
Alimentazione	-	Benzina

Tabella 4.4 – Dati di targa motore endotermico

4.2.5 Trasmissione meccanica

All'interno del blocco trasmissione, una volta nota la velocità di rotazione delle ruote, vengono calcolate le velocità angolari dei due motori mediante le equazioni 4.13 e 4.14.

$$\omega_{ICE} = \omega_R \cdot \tau_c \cdot \tau_p \quad (4.13)$$

$$\omega_{EM} = \omega_R \cdot \tau_t \cdot \tau_p \quad (4.14)$$

Al contrario, le coppie dei propulsori vengono ridotti alle ruote mediante le seguenti equazioni :

$$\begin{aligned} T_{ICEr} &= T_{ICE} \cdot \tau_c \cdot \tau_p \cdot \eta_c \cdot \eta_p & T_{ICE} &\geq 0 \\ T_{ICEr} &= T_{ICE} \frac{\tau_c \cdot \tau_p}{\eta_c \cdot \eta_p} & T_{ICE} &< 0 \end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} T_{EMr} &= T_{EM} \cdot \tau_t \cdot \tau_p \cdot \eta_t \cdot \eta_p & T_{EM} &\geq 0 \\ T_{EMr} &= T_{EM} \frac{\tau_t \cdot \tau_p}{\eta_t \cdot \eta_p} & T_{EM} &< 0 \end{aligned} \quad (4.16)$$

Mentre i rispettivi momenti d'inerzia :

$$J_{ICEr} = J_{ICE} \cdot \tau_c^2 \cdot \tau_p^2 \quad (4.17)$$

$$J_{EMr} = J_{EM} \cdot \tau_t^2 \cdot \tau_p^2 \quad (4.18)$$

Gli input ricevuti da questo sottomodello risultano quindi essere, oltre alla velocità di rotazione delle ruote e alle coppie erogate dai propulsori, la marcia inserita. Mentre, come output, si ottengono la velocità di rotazione dei motori, le coppie ed i momenti d'inerzia ridotti alla ruota.

4.2.6 Frizione

Come precedentemente menzionato, per implementare strategie ibride, è necessario che l'algoritmo di gestione del drivetrain abbia il pieno controllo del cambio e della frizione. Il modello della frizione deve essere in grado di indurre nel motore endotermico un comportamento il più possibile simile alla realtà nelle diverse condizioni di esercizio del veicolo. Non si intende quindi rappresentare né il comportamento fisico del sistema d'attrito della frizione né i transitori di coppia dovuti alle deformabilità del sistema.

Il modello utilizzato presenta dunque diverse ipotesi semplificative, successivamente vengono riportate le più importanti.

- 1) Viene trascurata la dinamica del circuito idraulico degli attuatori.
- 2) Viene trascurata la dinamica dei dischi d'attrito con relativa molla di pre-carico.
- 3) Viene trascurata la deformabilità del parastrappi e del gruppo semiassi-ruota – pneumatico.
- 4) Non viene considerata la relazione fra la forza normale agente sui dischi frizione e la coppia trasmessa, quest'ultima verrà determinata in modo tale da rappresentare fisicamente un processo di innesto frizione.
- 5) Viene trascurata la dinamica dei sincronizzatori.

Avendo trascurato nella modellazione del sistema cambio – frizione la dinamica del sistema idraulico, vengono introdotti dei ritardi opportuni necessari alle varie sequenze del processo di cambiata.

La coppia trasmessa dalla frizione T_c è determinata dall'algorithmo di controllo dell'attuatore della frizione. La logica di attuazione della frizione risulta essere mirata a minimizzare il costo computazionale in fase di calcolo e riprodurre fedelmente il comportamento della trasmissione Dual Logic Magneti Marelli. Come mostrato in Figura 4.9 l'algorithmo con il quale si realizza il modello definisce la coppia trasmessa dalla frizione mediante un controllore proporzionale in feedback sulla velocità di rotazione del motore.

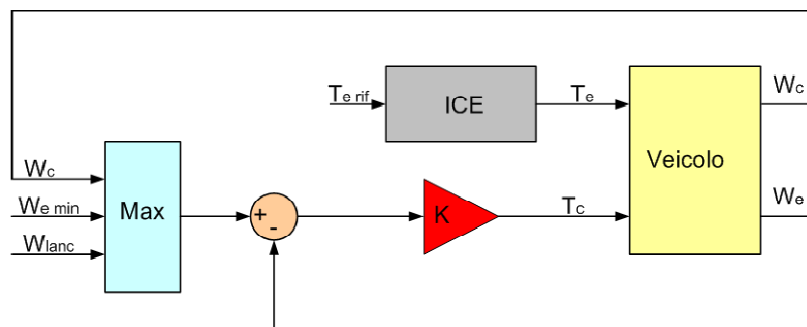


Figura 4.9 - Schema logico innesto frizione

- 1) $\omega_{e\ min}$: regime di rotazione minimo del motore endotermico, questo riferimento serve a non far spegnere il propulsore durante la fase di innesto frizione.
- 2) ω_{lanc} : velocità angolare che dipende dalla richiesta di coppia del guidatore, se la richiesta di coppia è elevata questo riferimento permette al motore di aumentare il proprio regime di rotazione evitando brusche sollecitazioni in partenza.
- 3) ω_c : regime di rotazione del disco condotto della frizione, a innesto avvenuto il controllore tende ad annullare la differenza $\omega_c - \omega_e = \Delta\omega$ quindi, a portare la frizione al completo innesto (sticking clutch).

4.2.7 Veicolo

Questo sottomodulo rappresenta la dinamica longitudinale del veicolo. Ricevendo in input le coppie e i momenti d'inerzia ridotti alla ruota e provenienti dal blocco trasmissione, fornisce in output la velocità delle ruote allo stesso blocco da cui provengono gli input.

Le forze di resistenza all'avanzamento sono definite dalle equazioni :

$$F_a = 2 \cdot \rho_{aria} \cdot C_x \cdot S \cdot v^2 \quad (4.19)$$

$$F_p = m \cdot g \cdot \sin\alpha \quad (4.20)$$

$$F_r = m \cdot g \cdot (f_0 + f_1 \cdot v^2) \quad (4.21)$$

La forza di trazione risulta quindi espressa dall'equazione :

$$T_r = (F_a + F_p + F_r) \cdot R_{ruota} \quad (4.22)$$

Mentre la massa equivalente :

$$m_{eq} = m + \frac{J_{EMr} + J_{ICEr} + J_{ruote}}{R_{ruota}^2} \quad (4.23)$$

Mediante l'integrazione dell'equazione 4.24 si ottiene la velocità del veicolo dalla quale è immediato il calcolo della velocità di rotazione delle ruote.

$$F_{motrice} - \frac{T_r}{R_w} = m_{eq} \cdot a \quad (4.24)$$

4.2.8 Servizi Ausiliari

Gli organi ausiliari (luci, ventole, ecc) sono alimentati tramite una corrente fornita dalla batteria a 12 V di serie sulla FIAT Grande Punto. La batteria di serie è caricata dalla batteria al Litio tramite un DC/DC converter, che trasforma la corrente continua della batteria primaria in una corrente continua compatibile con gli ausiliari alimentati con corrente a 12 V. Gli ausiliari assorbono una potenza variabile in funzione del numero di elementi in funzione. La corrente assorbita è data dall'equazione :

$$I_{aux} = \frac{P_{aux}}{V_{aux}} \quad (4.25)$$

P_{aux} = potenza assorbita dagli organi ausiliari , V_{aux} = tensione della batteria di serie (12V) .

Il DC/DC converter deve erogare una corrente continua pari a quella assorbita dagli ausiliari ad una tensione di 12 V. Noto il rendimento della macchina, la potenza che questa assorbe dalla batteria è calcolabile mediante l'equazione :

$$P_{DC/DC} = \frac{P_{aux}}{\eta} \quad (4.26)$$

$P_{DC/DC}$ = potenza assorbita dal DC/DC converter, η = rendimento del DC/DC converter.

La corrente che la batteria fornisce al DC/DC converter risulta invece determinabile mediante l'equazione :

$$I_{DC/DC} = \frac{P_{DC/DC}}{V_{DC}} \quad (4.27)$$

$I_{DC/DC}$ = corrente entrante nel DC/DC converter, V_{DC} = tensione ai morsetti della batteria al Litio.

4.2.9 Serbatoio

A bordo della vettura, vi è un serbatoio che contiene fino a 45 litri di benzina. Durante il funzionamento in modalità che non prevedono il funzionamento del motore endotermico, la quantità di carburante all'interno del serbatoio rimane costante. Quando, invece il motore a combustione interna è in funzione, il livello del carburante decresce in maniera direttamente proporzionale al flusso di combustibile uscente dal serbatoio.

Data, quindi, una quantità iniziale di combustibile immagazzinato Q_i e un flusso di benzina variabile nel tempo $\rho(t)$, è facilmente calcolabile il livello di carburante ad un dato istante tramite l'equazione :

$$Q(i) = Q_i - \int_{t_i}^t \rho(t) \cdot dt \quad (4.28)$$

4.2.10 Modello Termico

Il modello termico permette l'inserimento della temperatura ambiente, dato utile durante i controlli di temperatura del modulo di batteria e dell'azionamento elettrico.

4.3 Modellazione del sistema di accumulatore energetico innovativo batteria – supercapacità

Il sottomodello, riguardante l'innovativo sistema di accumulo dell'energia proposto, risulta essere suddiviso in tre differenti macro blocchi, come mostrato in Figura 4.10.

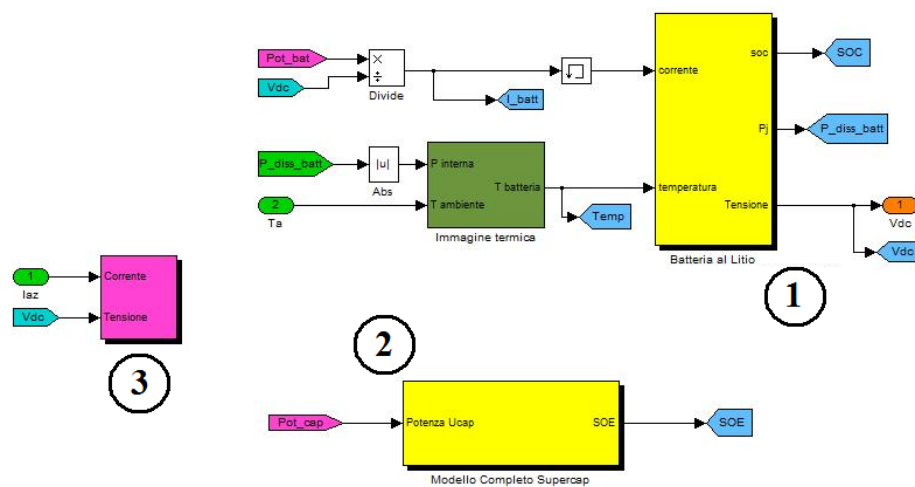


Figura 4.10 – Modello Batteria & Supercapacitori

- 1) Modello di batteria
- 2) Modello di supercondensatori
- 3) Centralina di collegamento con il gestore di bordo

Il segnale di corrente, proveniente dall'azionamento elettrico, moltiplicato per la tensione di batteria, fornisce la potenza richiesta dall'azionamento elettrico, quest'ultima viene inviata al blocco denominato gestore di bordo, il quale, ripartisce la potenza richiesta tra il modulo di batteria e quello dei supercondensatori.

Il modulo di batteria è rappresentato mediante il circuito equivalente di Figura 4.11 dove sia la resistenza interna R_{in} sia la tensione erogabile V_0 sono funzione del SOC e della temperatura.

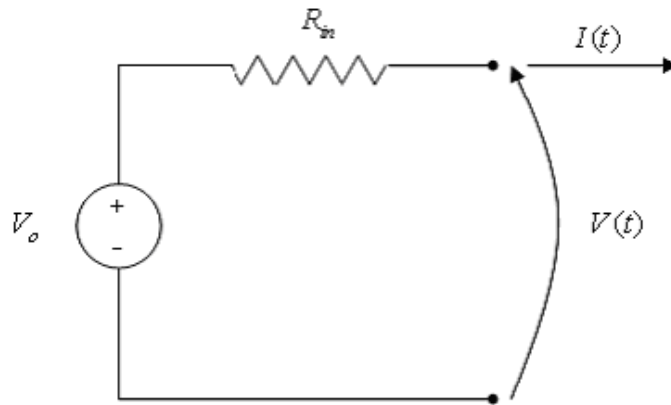


Figura 4.11 – Circuito elettrico equivalente

Nota la potenza richiesta dall'inverter, il sottomodulo corrispondente alla batteria risolve l'equazione di secondo grado (4.29) per ricavare la corrente erogata dal sistema di accumulo.

$$P_{bat} = V_0(SOC, T) \cdot I_{bat} - R_{in}(SOC, T) \cdot I_{bat}^2 \quad (4.29)$$

La dipendenza della tensione e della resistenza interna dal SOC viene introdotta tramite lookup table ricavate sperimentalmente.

Successivamente verranno presi in considerazione due differenti tipologie di batterie da utilizzare per ricreare il modulo di accumulo innovativo per veicoli bimodali, formato dalla batteria in parallelo con il modulo di supercondensatori.

Il modulo di batteria, effettivamente in uso sul prototipo bimodale della FIAT Grande Punto 1.2, con cui si è disputato il 2° Trofeo Aria Nuova, risulta composto da 60 elementi collegati in serie tra loro, i dati, relativi alla batteria a ioni di litio (ThunderSky) utilizzati per le simulazioni sono riportati in Tabella 4.5.

Batteria - Ioni di litio		
Numero di elementi in serie	-	60
Capacità	Ah	50
Massa	kg	100
Corrente massima in carica	A	-60
Corrente massima in scarica	A	110

Tabella 4.5 – Batteria Ioni di litio - ThunderSky

Al contrario, l'introduzione del modulo di ultracapacitori in parallelo alla batteria, ha portato ad un notevole ridimensionamento della batteria stessa, infatti convogliando parte della potenza richiesta dall'azionamento ai supercondensatori, possono essere scelti elementi con capacità inferiore. Si è inoltre deciso di utilizzare una differente tipologia di batteria rispetto alle batterie a ioni di litio fin ora considerate, ossia le batterie litio-polimeri (Kokam), le quali a parità di capacità presentano un peso inferiore.

Batteria - Litio-Polimeri		
Numero di elementi in serie	-	60
Capacità	Ah	35
Massa	kg	50
Corrente massima in carica	A	-60
Corrente massima in scarica	A	150

Tabella 4.6 – Batteria Litio-Polimeri – KOKAM

Le batterie ricaricabili, note come accumulatore litio-polimero, o più raramente batterie litio-ione-polimero (abbreviato li-poly o lipo) risultano essere uno svi-

luppo tecnologico dell'accumulatore litio-ione. La principale caratteristica, che li differenzia, consiste nel fatto che l'elettrolita in sale di litio non è contenuto in un solvente organico, come nelle batterie litio-ione, ma si trova in un composito di polimero solido. Vi sono molti vantaggi in questo tipo di costruzione, che lo rendono superiore alle batterie litio-ione, tra cui il fatto che il polimero solido non è infiammabile, a differenza del solvente organico che le cellule a litio-ioni utilizzano, e di conseguenza queste batterie sono dunque meno pericolose se vengono danneggiate. Le celle che oggi vengono vendute come batterie litio-ione-polimero hanno uno schema diverso rispetto alle vecchie celle a ioni di litio. Infatti, a differenza delle celle in litio-ione, che erano contenute in minuscoli contenitori rigidi in metallo cilindrici o prismatici (a nido d'ape), le attuali celle polimeriche hanno una struttura a fogli flessibili, spesso pieghevoli, e formate da laminato polimerico.

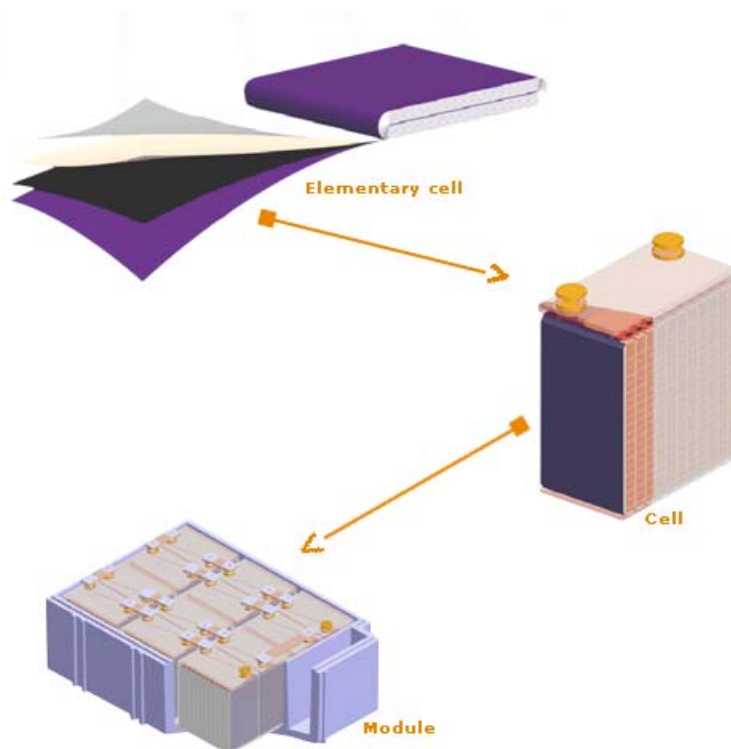


Figura 4.12 – Batterie litio-ione-polimeri

La maggiore differenza tra le celle in polimero e le celle litio-ione in commercio è che nelle seconde, il contenitore rigido pressa reciprocamente gli elettrodi ed il separatore, mentre in quelle a polimero questa pressione esterna non è richiesta perché i "fogli" di elettrodo ed i "fogli" del separatore (dielettrico) sono laminati ciascuno sull'altro. Dal momento che non è necessario nessun tipo di contenitore in metallo, la batteria può essere più leggera e sagomata per occupare lo spazio che gli è riservato nell'apparecchio da alimentare. Inoltre avendo un impacchettamento più denso senza spazi tra le celle cilindriche e senza contenitore, la densità energetica delle batterie li-poly è maggiore del 20% rispetto ad una litio-ione.

In questo modo con l'introduzione dei supercondensatori ed il conseguente utilizzo di una batteria più leggera hanno portato ad un risparmio dei pesi pari a 33.2 kg, ossia il 2.3 % del peso complessivo del veicolo.



Figura 4.13 – Modulo di batteria litio – Polimeri (KOKAM)

Per quanto concerne il sottomodello rappresentante il modulo di ultracapacitori, esso risulta essere composto da due blocco principali: il convertitore ed il modello vero e proprio di supercondensatori.

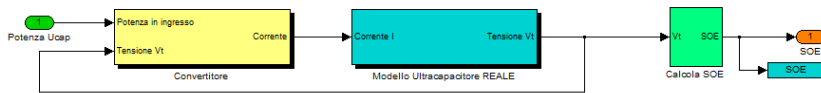


Figura 4.14 – Sottomodello Ultracapacitori

Il blocco convertitore, come mostrato in Figura 4.15, riceve in ingresso la potenza richiesta al modulo di supercondensatori e la tensione V_t del banco e fornisce in uscita la corrente richiesta al modulo di supercapacitori.

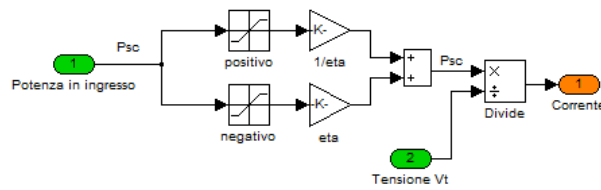


Figura 4.15 - Convertitore

In questo caso occorre fare una precisazione, infatti all'interno del simulatore la potenza positiva viene vista dal convertitore come una richiesta di potenza ai morsetti del modulo di supercondensatori e per questo motivo nel simulatore viene incrementata tenendo conto del rendimento del convertitore (4.29). Al contrario nel caso di potenza negativa, questa viene vista come potenza ceduta al modulo di supercapacitori, al fine di ricaricarli, e perciò viene abbattuta in base al rendimento (4.30).

$$P_{sc} = \frac{P_{in}}{\eta_{conv}} \quad P_{in} \geq 0 \quad (4.29)$$

$$P_{sc} = P_{in} \cdot \eta_{conv} \quad P_{in} < 0 \quad (4.30)$$

Il convertitore presenta un rendimento costante e pari a $\eta_{conv} = 0.95$.

La corrente in uscita dal convertitore viene inviata al modello del banco di ultracapacitori.

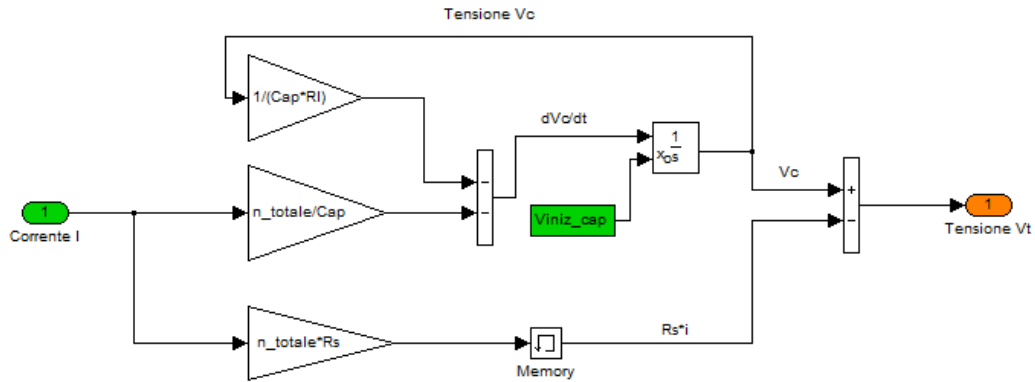


Figura 4.16 – Modello banco Ultracapacitori

La tensione terminale di un supercondensatore, durante il processo di scarica può essere espressa mediante l'equazione 4.31 :

$$V_t = V_c - i \cdot R_s \quad (4.31)$$

Il potenziale elettrico, come già specificato nel paragrafo 2.7, viene determinato mediante l'equazione :

$$\frac{dV_c}{dt} = - \left(\frac{V_c}{C \cdot R_l} + \frac{i}{C} \right) \quad (4.32)$$

Integrando quest'ultima equazione, risulta possibile ottenere l'espressione della tensione dell'ultracapacitore V_c :

$$V_c = \left[V_{c0} - \int_0^t \frac{i}{C} \cdot e^{t/C \cdot R_l} \cdot dt \right] e^{-t/C \cdot R_l} \quad (4.33)$$

Risulta quindi possibile determinare la tensione V_t utilizzando l'equazione 4.31.

Infine la tensione V_t viene inviata al blocco per il calcolo del SOE, determinato mediante l'equazione 4.34.

$$SOE = \frac{V_t}{V_{max}} \quad (4.34)$$

Dove con V_{max} si intende la tensione massima sopportabile dal banco di supercondensatori e pari a 160 V.

Vengono infine forniti in Tabella, i dati tecnici relativi ai supercondensatori utilizzati durante le simulazioni numeriche.

K2 SERIES		BCA P1500 P270
Tensione continua	[V]	2,7
Capacità nominale	[F]	1500
Resistenza DC serie	[mΩ]	0,47
Potenza specifica (Vnominale)	[W/kg]	6600
Energia specifica (Vnominale)	[Wh/kg]	5,42
Massima corrente continuativa	[A]	97
Corrente di dispersione	[mA]	3
Resistenza di dispersione	[Ω]	900
Temperatura minima di esercizio	[°C]	-40
Temperatura massima di esercizio	[°C]	65
Peso (singolo elemento)	[kg]	0,28
Dimensioni $\varnothing \times L$	[mm]	60 x 85
Numero di blocchi in serie	-	60
Numero di blocchi in parallelo	-	1
Numero di blocchi totali	-	60

Tabella 4.7 - Dati Tecnici Supercondensatori Maxwell

La quantità di energia disponibile dal banco di supercapacitori (SOE), così come la quantità di energia disponibile in batteria (SOC) vengono inviati al blocco di gestione di bordo per regolare la divisione della potenza tra batteria e ultracapacitori.

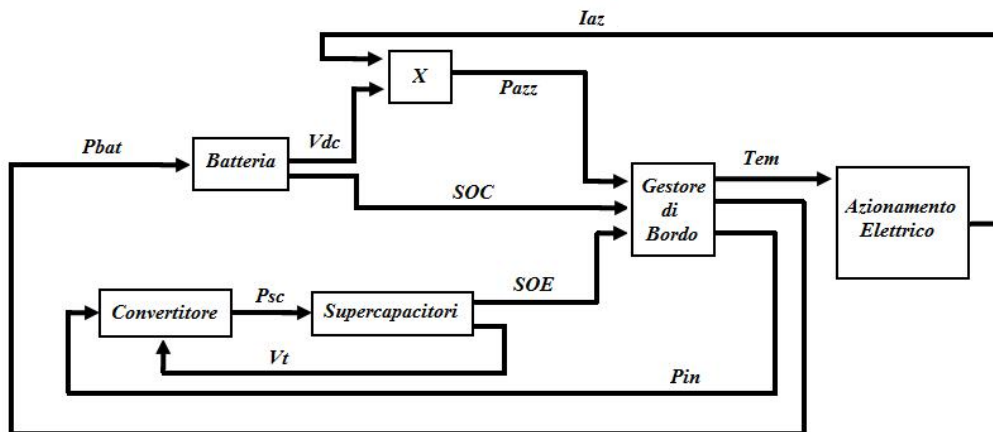


Figura 4.17 – Flussi di Potenza inerenti al sistema di accumulo energetico

4.4 Strategia di gestione dell'energia di bordo

Originariamente, nel gestore di bordo erano presenti due funzioni che controllavano rispettivamente il cambio e la ripartizione di coppia fra il motore elettrico e quello endotermico. Il regime di rotazione del motore endotermico al quale veniva cambiata marcia risultava dipendente dal segnale dell'acceleratore e mappato sperimentalmente. Inoltre la ripartizione di coppia fra i due propulsori presenti a bordo dipendeva dalla logica di gestione del veicolo ibrido.

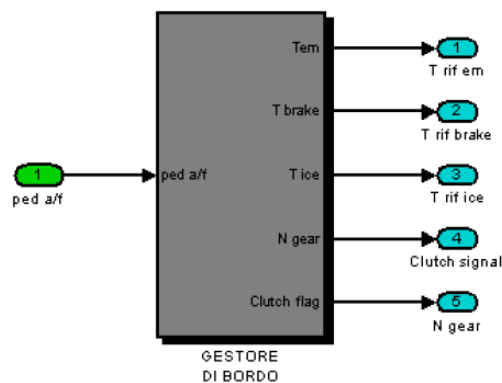


Figura 4.18 – Gestore di bordo originale

Riassumendo, il gestione di bordo riceveva in input il segnale di accelerazione e freno proveniente dal blocco pilota e forniva come output il numero di marcia, il segnale della frizione, la coppia di riferimento del motore endotermico, la coppia di riferimento per l'azionamento elettrico e la coppia richiesta all'impianto idraulico di frenatura.

L'introduzione del nuovo accumulatore energetico innovativo, comprensivo del modello dei supercondensatori e la conseguente logica di gestione, ha portato notevoli cambiamenti all'interno del sottomodello denominato gestore di bordo, come mostrato nella seguente Figura.

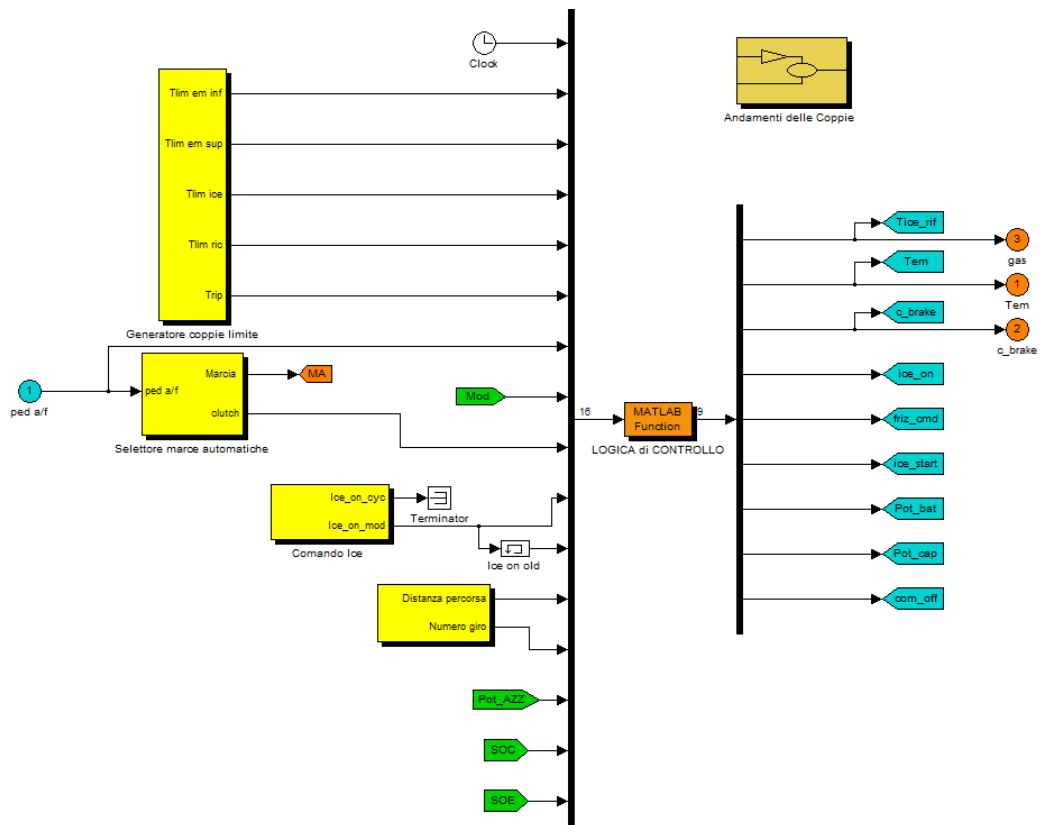


Figura 4.19 – Sottomodello gestore di bordo

Nel nuovo schema a blocchi risulta possibile distinguere, oltre alla logica di controllo, 3 sottomodelli differenti:

1. Generatore di coppie limite
2. Selezionatore di marce automatico
3. Accensione del motore Endotermico

Mediante il generatore di coppie limite risulta possibile calcolare :

- 1) Limite fisico di coppia superiore ed inferiore del motore elettrico
- 2) Limite di coppia superiore del motore endotermico
- 3) Limite di coppia negativo del motore elettrico
- 4) Il valore della coppia del motore elettrico durante il funzionamento del prototipo bimodale in modalità endotermica

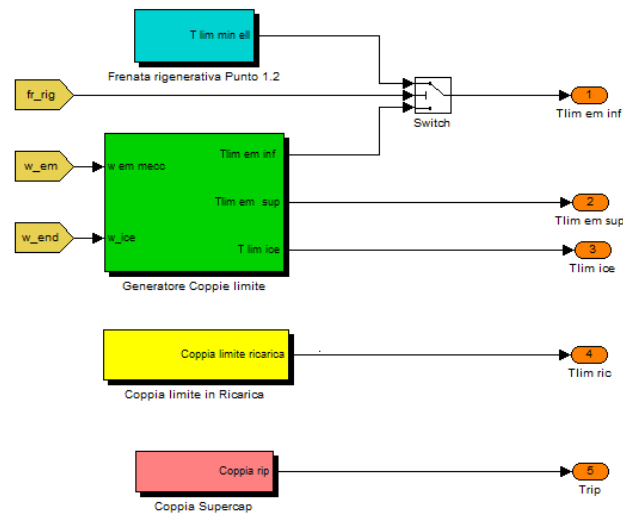


Figura 4.20 – Generatore di coppie limite

Come precedentemente accennato, al fine di poter validare correttamente il simulatore numerico, opportunamente modificato, si è inserito un limite inferiore di coppia in elettrico differente a seconda della necessità. Mediante il blocco di colore azzurro risulta possibile generare una coppia limite inferiore negativa, in grado di approssimare la ricarica in frenata registrata sperimentalmente durante le gare disputate nel circuito di Monza. Al contrario nel blocco di colore verde vengono generate le coppie limite massime e minime consentite in funzione del-

la velocità angolare del motore elettrico e derivanti dai limiti fisici del motore elettrico (limite imposto dall'inverter). Al contrario del blocco precedentemente illustrato, in questo caso i limiti generati risultano essere i valori massimi o minimi permessi dall'azionamento elettrico e dalla batteria precedentemente modellizzati.

Analogamente per il motore endotermico, la coppia limite superiore risulta in funzione della velocità angolare del motore combustione interna.

Dovendo abilitare il recupero di energia massimo, durante le frenate eseguite mediante il prototipo bimodale, è risultato opportuno dimensionare la coppia resistente di ricarica in modo tale che la corrente non superi mai il limite massimo negativo, sopportabile dalla batteria. L'espressione della coppia resistente in funzione della velocità di marcia e dei parametri di batteria risulta espressa dall'equazione 4.35 :

$$T_{fren} = \frac{I_{ric} \cdot V_{bat}}{\omega_{ell} \cdot \eta_{glob}} \quad (4.35)$$

dove la corrente massima (negativa) di ricarica risulta pari a $I_{ric} = -60$ A, mentre con il rendimento globale si intende il prodotto tra il rendimento della trasmissione, del motore elettrico e dell'inverter e risulta pari a $\eta_{glob} = 0.85$.

Le coppie limite così determinate vengono inviate al gestore di bordo il quale fornisce la coppia, elettrica ed endotermica, di riferimento ai due diversi propulsori.

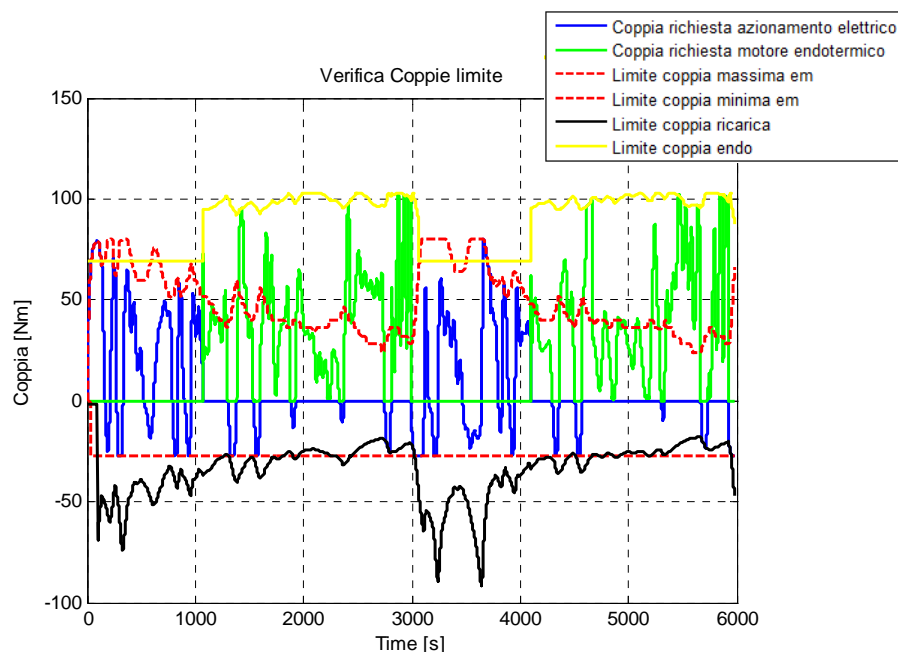


Figura 4.21 – Esempio di applicazione dei limiti imposti

In Figura 4.21, vengono riassunti tutti i limiti che il gestore di bordo impone in modo da determinare le coppie di riferimento, in modalità elettrica o endotermica, necessarie al veicolo bimodale. Come si può facilmente osservare, il riferimento di coppia del motore endotermico viene limitato superiormente in funzione del limite di coppia superiore. La medesima limitazione può essere osservata anche nel caso si osservi l'andamento della coppia nel motore elettrico. Per quanto concerne il limite di coppia negativo invece questo varia a seconda che il limite di coppia negativo del motore elettrico risulti superiore od inferiore al limite di coppia imposto dall'inverter. Il gestore di bordo infatti predilige la limitazione più restrittiva tra le due a disposizione.

Mediante il blocco, denominato selettore delle marce, il simulatore numerico risulta in grado di cambiare autonomamente la marcia in uso dal veicolo bimodale. Si fa notare che, qualora si passi dalla modalità elettrica a quella endotermica, il motore endotermico viene innestato in quarta marcia, al fine di eliminare tutti gli effetti negativi che si sviluppano nel motore a combustione interna nei transitori iniziali.

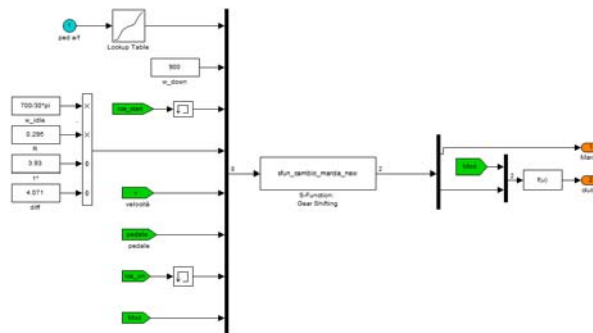


Figura 4.22 – Selettore delle marce

Dando in ingresso la velocità di marcia, il segnale del pedale ed i limiti imposti, la funzione *sfun_cambio_marcia_new.mat*, implementata in Matlab[®], risulta in grado di selezionare la marcia appropriata in ogni situazione.

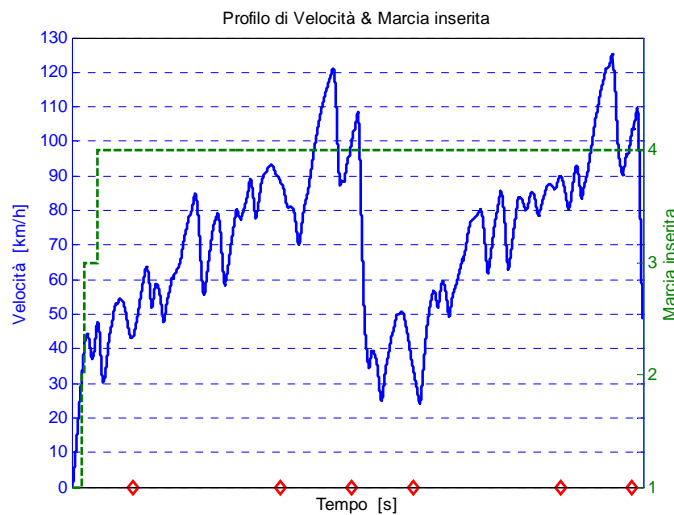


Figura 4.23 – Profilo di velocità e Relativa Marcia inserita

Per quanto concerne invece il blocco di accensione ritardata del motore endotermico, questo risulta in grado di ritardarne l'accensione. Infatti rispetto alla gara disputata nell'Autodromo di Monza, durante le simulazioni viene aumentato il limite di velocità in cui si passa dalla modalità elettrica a quella endotermica. Risulta facile intuire che il surplus di energia elettrica richiesta ed i relativi picchi di potenza verranno gestiti dalla logica di controllo e richiesti al modulo di supercondensatori.

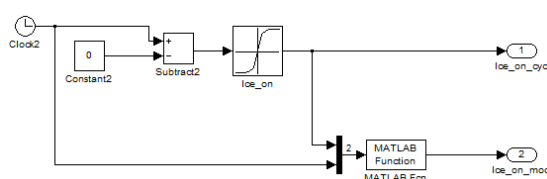


Figura 4.24 – Accensione motore endotermico

Osservando il grafico sottostante risulta possibile osservare come il motore endotermico, durante le simulazioni, venga acceso (linea rossa) ad una velocità superiore rispetto al caso registrato sperimentalmente (linea verde). In questo modo in simulazione si può registrare un ritardo pari dt dell'accensione del motore endotermico rispetto alle acquisizioni sperimentali effettuate durante la gara.

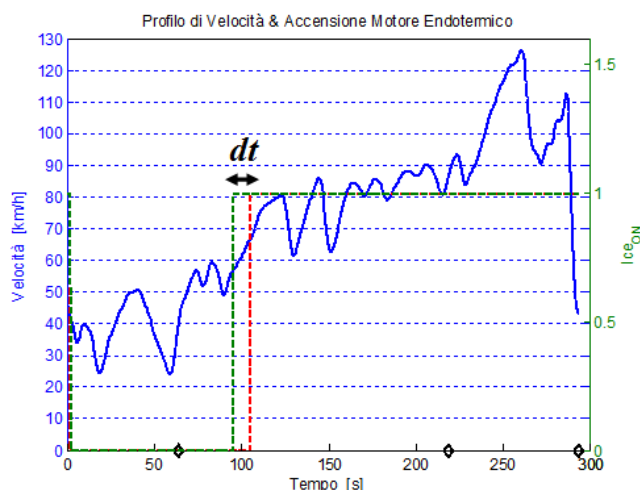


Figura 4.25 – Profilo di Velocità e Comando di Accensione Motore Endotermico

Al fine di poter effettuare dei confronti sulle varie simulazioni eseguite e riguardanti le differenti gare disputate nell'autodromo di Monza, il tempo di ritardo ($dt = 10$ s) è stato fissato a priori, in modo da essere uguale su tutte le simulazioni. Inoltre si ricorda che, come anche precedentemente spiegato, i riferimenti nei grafici illustrati rappresentano i settori in cui è stato diviso il circuito di Monza (tratta urbana, extraurbana ed autostradale).

All'interno del blocco gestore di bordo, mediante la funzione *mat_logica_di_controllo.mat*, realizzata in Matlab[®] vi è implementata la logica di gestione dell'accumulatore energetico innovativo proposto. Viene inoltre inserito in Appendice A il listato Matlab[®] inerente a tale funzione.

La funzione riceve in ingresso :

1. Tempo di simulazione
2. Coppia limite inferiore motore elettrico
3. Coppia limite superiore motore elettrico
4. Coppia limite superiore motore endotermico
5. Coppia limite in funzione della corrente massima
6. Coppia di ripartizione in funzione della potenza dei Supercapacitori
7. Segnale del pedale
8. Modalità
9. Segnale clutch
10. Comando di accensione motore endotermico
11. Comando di accensione motore endotermico precedente
12. Distanza percorsa
13. Numero di giri percorsi
14. Potenza richiesta all'azionamento elettrico
15. SOC
16. SOE

Mentre la funzione restituisce in uscita :

1. Coppia di riferimento – Motore Endotermico
2. Coppia di riferimento – Motore Elettrico
3. Coppia di riferimento impianto frenante
4. Comando di accensione motore endotermico
5. Segnale della frizione
6. Potenza di Batteria
7. Potenza Banco di Supercondensatori
8. Segnale logico motore elettrico

La logica utilizzata viene espressa sottoforma di diagramma di flusso, come mostrato in Figura 4.26, [40-41].

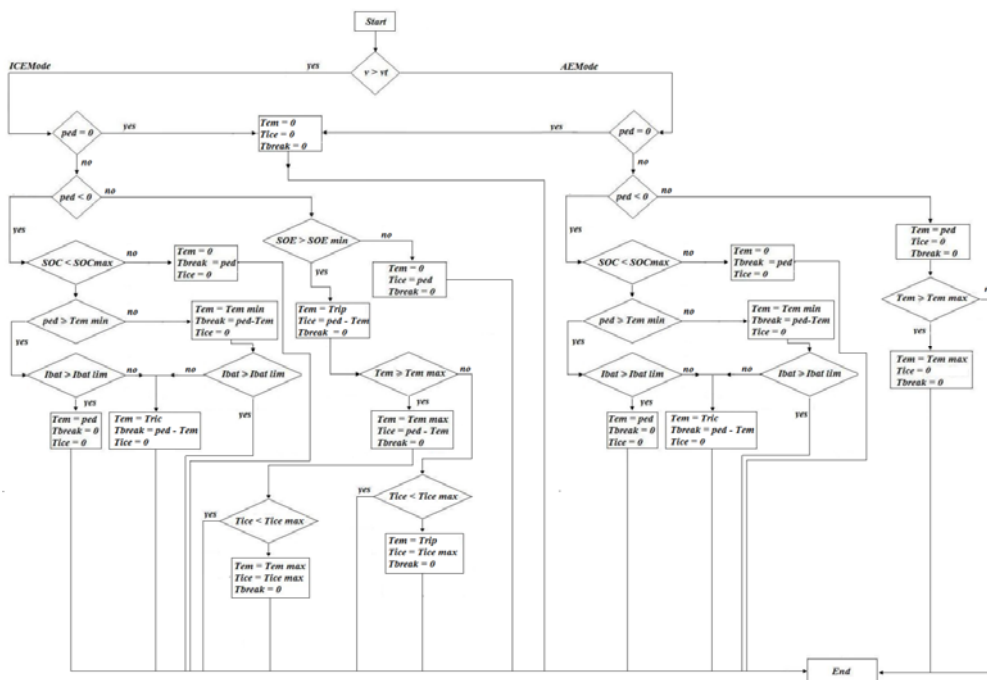


Figura 4.26 – Diagramma di flusso

Il gestore di bordo, risulta in grado di gestire il segnale del pedale proveniente dal blocco pilota, al fine di ripartire in modo opportuno la coppia tra i due motori, necessaria al veicolo per garantire l'inseguimento di velocità desiderato.

In primo luogo, a seconda della velocità a cui il veicolo sta procedendo, il gestore di bordo aziona la modalità endotermica (ICE) piuttosto che quella elettrica (EM). In particolare se la velocità, a cui si sta procedendo, risulta inferiore alla velocità di soglia, viene azionato unicamente il motore elettrico, mentre in caso contrario, per velocità superiori alla velocità di soglia, viene richiesta potenza al motore endotermico. Al fine di confrontare i risultati ottenuti attraverso il simulatore con quelli rilevati durante le gare disputate a Monza, si inserisce all'interno del simulatore un comando di accensione del motore endotermico, il cui segnale è stato registrato sperimentalmente, in modo da mantenere la medesima configurazione utilizzata nelle diverse gare disputate.

Concentrandosi sul ramo endotermico denominato ICE-Mode si può osservare come la logica di controllo ripartisca il segnale ped proveniente dal blocco pilota. Nel caso in cui il segnale risulti positivo viene richiesta potenza al motore endotermico, in quanto si vuole aumentare la velocità a cui si sta procedendo, mentre al contrario, nel caso in cui il segnale del pedale risulti negativo si desidera che il veicolo rallenti. Infine, se il pedale risulta nullo vengono impartite coppie nulle.

Qualora arrivi al gestore di bordo una richiesta di coppia positiva, durante la marcia in endotermico, la logica gestisce la ripartizione tra motore elettrico ed endotermico, in modo da sgravare l'utilizzo del motore a combustione interna, con il fine ultimo di produrre un consumo inferiore di combustibile fossile. L'energia utilizzata dal motore elettrico in aiuto a quello endotermico viene fornita dai supercapacitori come verrà illustrato successivamente.

Al contrario, per una richiesta di coppia negativa, la logica implementata all'interno del simulatore, prevede l'inserimento, qualora lo si desideri, della frenata rigenerativa, ovviamente rispettando il limite imposto dalla batteria in termini di corrente negativa massima in ricarica ed il limite fisico di coppia massima negativa imposto dall'azionamento elettrico, o più precisamente dal limite di ricarica dell'inverter. Per frenata rigenerativa si intende frenare il veicolo richiedendo coppia negativa all'azionamento elettrico che, in questo caso, funziona da generatore ricaricando la batteria tramite una corrente negativa. Nel caso in cui la frenata rigenerativa sia insufficiente o impossibile da attuare (batteria carica o coppia frenante richiesta troppo elevata) interviene l'impianto idraulico frenando il veicolo meccanicamente. Il sistema di frenata in elettrico consente di recuperare con una efficienza piuttosto elevata (rendimento dell'azionamento elettrico e della trasmissione) l'energia cinetica del veicolo che altrimenti andrebbe dissipata in calore attraverso la frenatura meccanica.

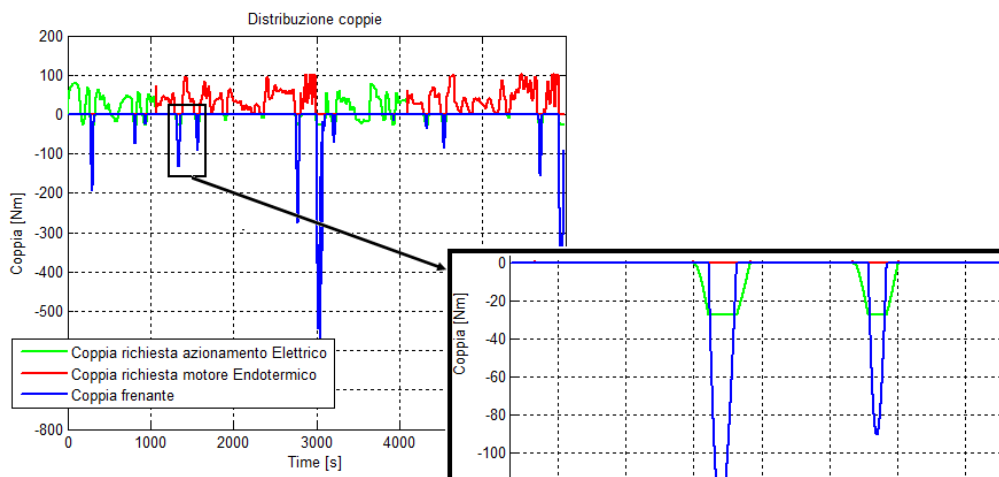


Figura 4.27 – Distribuzione delle Coppie di Riferimento

A questo punto occorre fare una precisazione, infatti l'energia recuperata durante la frenatura viene indirizzata all'interno dei supercondensatori e solo quando

questi risultano carichi, l'energia residua viene convogliata in batteria. Verificato dunque che nella batteria risulti possibile incrementare l'energia, la logica di controllo verifica quale dei due limiti sopra citati risulti il più restrittivo e lo impone come limite di coppia massima negativa sopportabile dall'azionamento elettrico, la restante coppia richiesta viene fornita dall'impianto frenante. In questo modo la corrente entrante in batteria risulta al massimo uguale a quella limite pari a -60 A e non viene mai superato il limite di coppia di ricarica dell'inverter pari a -27.5 Nm .

Analizzando invece il ramo elettrico, denominato AE-Mode, si può notare come anche in questo secondo caso, quando il segnale del pedale risulta negativo viene generato dal gestore di bordo una coppia di riferimento negativa e compatibile coi limiti sopra esposti. Al contrario in caso di segnale positivo la logica di controllo genera una coppia di riferimento positiva e limitata dal limite di coppia massima ammissibile dall'azionamento elettrico.

All'interno del gestore di bordo, vi è implementata anche logica di ripartizione della potenza tra il modulo di batteria e quello dei supercondensatori [42-43].

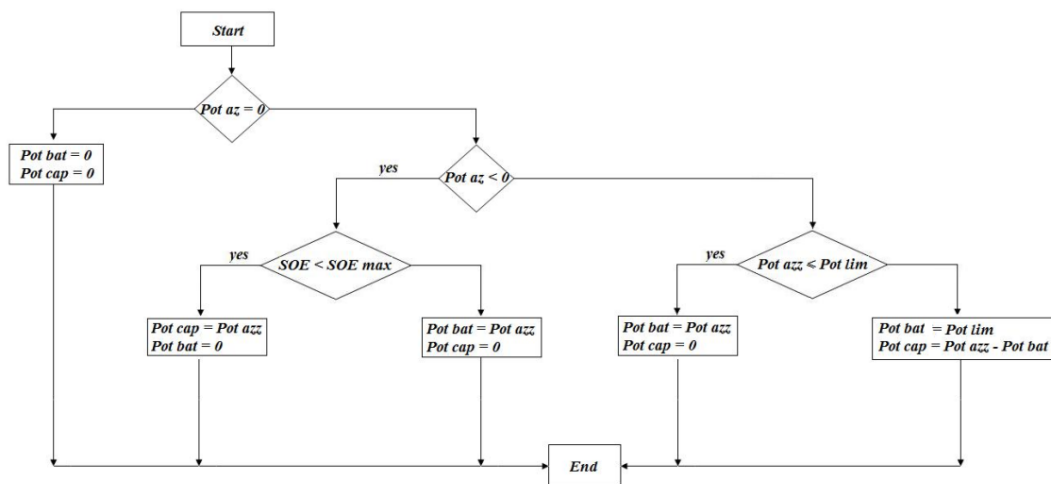


Figura 4.28 – Diagramma flusso di potenza

Nel caso di potenza positiva, ossia richiesta di potenza dall'azionamento alla batteria, durante la marcia in elettrico, si è deciso di utilizzare una logica di gestione a soglie. Infatti dalla teoria risulta noto come i supercapacitori siano utilizzati per gestire i picchi di potenza richiesti dagli azionamenti elettrici. Per questo motivo, all'interno del simulatore, durante la marcia in elettrico i supercapacitori forniscono l'energia necessaria per gestire i picchi di potenza richiesti alla batteria. In altre parole, fissato il limite di potenza, la logica ripartisce la potenza richiesta dall'azionamento tra la batteria ed i supercapacitori.

$$\begin{cases} P_{bat} = P_{lim} \\ P_{cap} = P_{az} - P_{lim} \end{cases} \quad (4.36)$$

Al contrario, durante la marcia in endotermico, l'energia necessaria al motore elettrico per fornire la coppia utile a mantenere il profilo di velocità desiderato riducendo i consumi di combustibile, viene fornita unicamente dai supercapacitori. In questo secondo caso una logica di gestione a soglie fisse sul consumo di combustibile non è risultata del tutto appropriata. Infatti il flusso di carburante, come ampiamente illustrato nel paragrafo dedicato al motore endotermico, risulta mappato sperimentalmente e derivante dalla coppia motrice che a sua volta risulta funzione del segnale di pedale fornito dal blocco gestore di bordo.

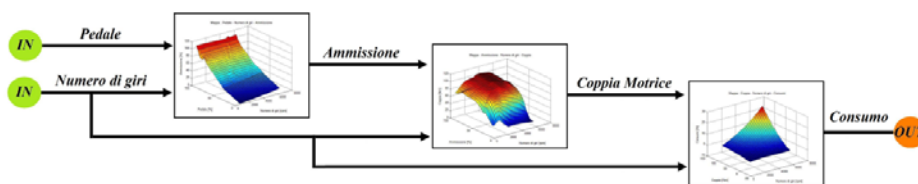


Figura 4.29 - Percorso diretto

Quindi, durante l'*i*-esimo istante t_i , il gestore di bordo ha a disposizione il valore del flusso di carburante calcolato al precedente istante t_{i-1} . Limitare in questo modo il flusso di carburante (o in alternativa la coppia motrice) produce una

continua accensione ed un continuo spegnimento dell'azionamento elettrico che ovviamente non possono essere accettati.

Successivamente, si è pensato di invertire le mappe calcolate sperimentalmente, in questo modo, risultava possibile, in linea teorica, controllare il flusso di carburante.

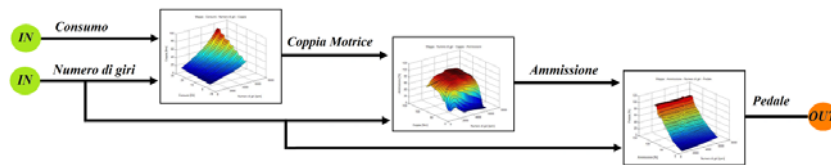


Figura 4.30 – Percorso inverso

Infatti, fissato il flusso di carburante che si vuole ottenere si può ricavare la corrispondente coppia motrice in funzione anche del numero di giri ed in cascata, la percentuale di ammissione ed il valore del pedale. In questo modo una volta noto il valore del pedale che genererà il flusso richiesto risulta immediato ripartire il valore del pedale totale richiesto dal blocco pilota.

Mediante questa procedura si può inoltre far lavorare il motore endotermico nelle zone in cui presenta rendimenti maggiori e fornire la restante coppia motrice in elettrico. Le mappe invertite, mediante l'ausilio del linguaggio di programmazione Matlab[®], non risultano così definite, soprattutto a basso grado di ammissione, da fornire un valore del segnale pedale sufficientemente approssimato per effettuare la ripartizione tra motore elettrico ed endotermico.

Si è quindi pensato di azionare i supercondensatori ad intervalli regolari tra le varie gare ed in punti ben precisi del tracciato di Monza. In particolare, la scelta dei punti in cui azionare i supercondensatori è dipesa da 2 differenti considerazioni: in primo luogo si è cercato di diminuire il più possibile i consumi, infatti i supercondensatori non presentano un'elevata energia e non possono quindi for-

nire una potenza elevata per lunghi periodi. Si sono quindi avvantaggiati quei punti in cui risultava maggiore il consumo di carburante. In secondo luogo, i supercondensatori necessitano per funzionare più volte durante un giro di pista di una frenata eseguita in elettrico al fine di ricaricarsi. Quindi, in virtù delle considerazioni appena esposte, sono stati scelti i punti in cui azionare i supercondensatori al fine di diminuire i consumi ed utilizzarli il maggior numero di volte possibile, compatibilmente con la manche che si sta affrontando.

Infine, per fornire potenza costante all'azionamento elettrico, il quantitativo di coppia richiesto all'azionamento elettrico viene modulato in funzione della velocità angolare a cui si sta procedendo, secondo l'equazione 4.37.

$$T_{em} = \frac{P_{cap}}{\omega_{ell}} \cdot \eta_{glob} \quad (4.37)$$

In questo modo viene richiesta potenza costante al banco di supercondensatori al fine di poterla gestire nei brevi intervalli in cui si deve azionare il motore elettrico per sgravare l'utilizzo di quello endotermico.

In Figura 4.31, viene mostrato un esempio di simulazione in cui si possono trovare riassunte le azioni eseguite dal gestore di bordo.

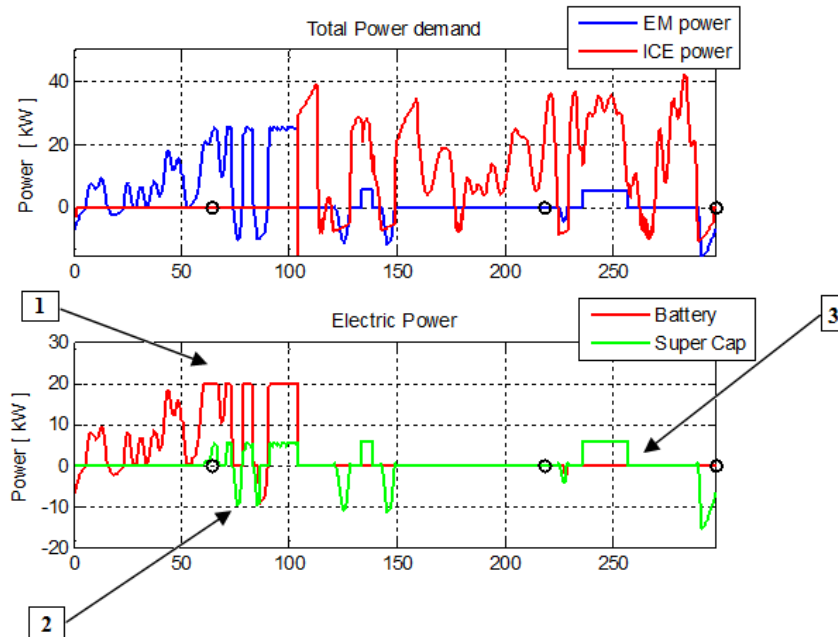


Figura 4.31 - Esempio di simulazione

In questo esempio, riguardante un singolo giro del circuito di Monza, si può notare come la potenza richiesta dall'azionamento elettrico, nel primo tratto, venga limitata in batteria a 20 kW, mentre la quota restante viene fornita dai supercondensatori (riferimento 1). Inoltre durante le fasi di frenata, si può notare come venga privilegiata la ricarica dei supercondensatori rispetto al modulo batteria, in cui si convoglia la restante potenza recuperata (riferimento 2). Infine, durante la marcia in endotermico, nel tratto autostradale, qualora risulti utile, viene azionato il motore elettrico in aiuto a quello endotermico e l'energia necessaria viene unicamente fornita dai supercondensatori (riferimento 3).

4.5 Verifica corretto funzionamento del modello di supercapacitori

In questo paragrafo si vuole valutare la bontà del modello numerico, riferito al banco di supercondensatori, ed utilizzato durante le simulazioni numeriche. Si è fornito in ingresso al banco di supercondensatori un ciclo in potenza di scarica e carica simmetrico, come mostrato in Figura 4.32, e si sono valutati gli andamenti della tensione e corrente totale entranti nel banco e l'andamento della percentuale di energia utilizzata (SOE).

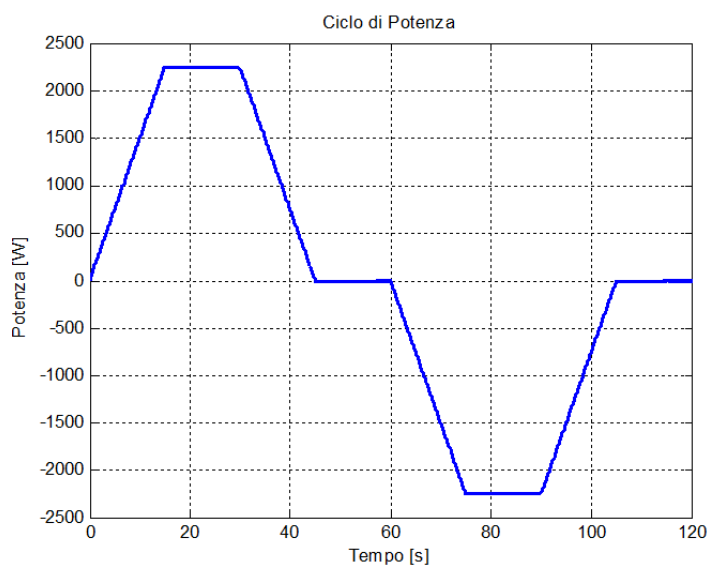


Figura 4.32 – Ciclo di Potenza Simmetrico

Il modulo di supercondensatori è stato considerato inizialmente carico, con un quantitativo di energia variabile a seconda del modello utilizzato.

Per questa prova vengono considerati i supercondensatori della serie K2 (Maxwell) ed i relativi dati sono raggruppati in Tabella 4.8.

K2 SERIES		BCA P0650 P270	BCA P1200 P270	BCA P1500 P270	BCA P2000 P270	BCA P3000 P270
Tensione continua	[V]	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Capacità nominale	[F]	650	1200	1500	2000	3000
Resistenza DC serie	[mΩ]	0,8	0,58	0,47	0,35	0,29
Potenza specifica (Vnominale)	[W/kg]	6800	5800	6600	6900	5900
Energia specifica (Vnominale)	[Wh/kg]	4,11	4,67	5,42	5,63	5,96
Massima corrente continuativa	[A]	62	81	97	123	147
Corrente di dispersione	[mA]	1,5	2,7	3	4,2	5,2
Resistenza di dispersione	[Ω]	1800	1000	900	642,86	519,23
Numero di blocchi totali	-	60	60	60	60	60
Tensione Iniziale Banco		[V]	155,5	155,5	155,5	155,5
Energia Iniziale Banco		[Wh]	36,38	67,17	83,96	111,95

Tabella 4.8 – Supercondensatori serie K2 – Maxwell

Come è logico aspettarsi, ad una richiesta di potenza positiva, che corrisponde ad un richiesta di energia da parte di un azionamento elettrico, comporta una conseguente diminuzione dell'energia contenuta all'interno del banco di supercondensatori. Per questo motivo, come mostrato in Figura 4.33, la tensione V_t decresce al crescere della richiesta di potenza ed aumenta nel caso contrario.

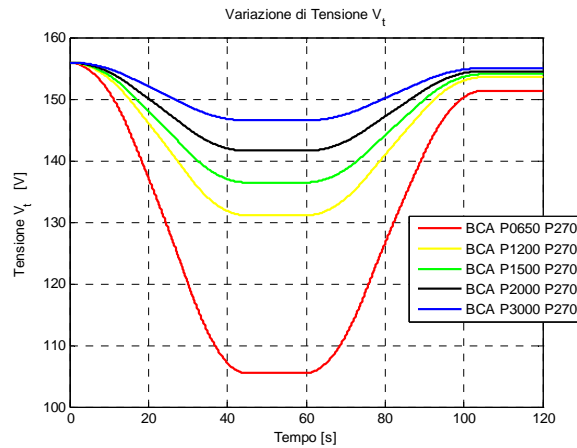


Figura 4.33 – Tensione V_t

Al contrario la corrente in ingresso nel modulo di supercondensatori risulta concorde col segno della potenza in ingresso, come mostrato in Figura 3.34.

Ad una richiesta di potenza si ottiene una variazione di corrente positiva in caso contrario negativa.

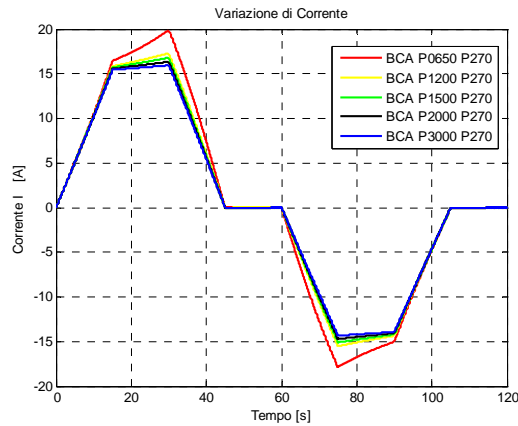


Figura 4.34 – Corrente circolante

Infine si mostra l'andamento dell'utilizzo energetico percentuale del banco di supercondensatori.

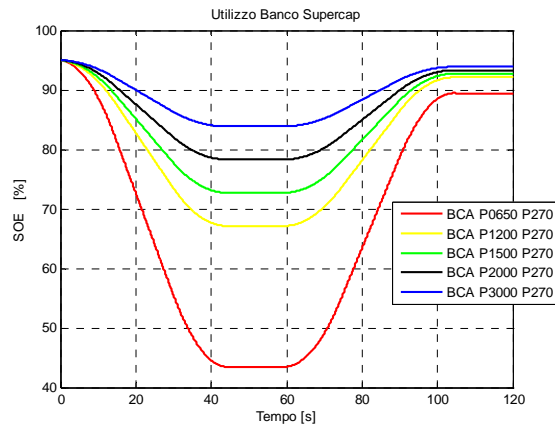


Figura 4.35 – SOE

Anche in questo caso, ad una richiesta di potenza positiva corrisponde una diminuzione dell'energia contenuta nel banco di supercondensatori, come mostrato in Figura 4.35. Gli andamenti riscontrati numericamente al simulatore risultano i medesimi studiati in teoria, si può quindi concludere che il modello riproduce correttamente i parametri del modulo di supercondensatori.

4.6 Validazione simulatore completo

Una volta apportate tutte le modifiche necessarie all'inserimento del banco di supercondensatori si è passati alla validazione del simulatore numerico. Avendo a disposizione i dati sperimentali ricavati sul circuito di Monza, è stato possibile verificare che gli andamenti delle variabili di interesse fossero seguiti correttamente. Successivamente, si sono valutati gli errori prodotti dal simulatore in termini di consumo di carburante ed utilizzo energetico del batteria. In queste prime simulazioni non è stato considerato il modulo di supercondensatori in quanto non presente sulla vettura su cui si sono rilevati i dati sperimentali.

Durante le gare disputate sul circuito di Monza, sono stati acquisiti i diversi profili di velocità, i quali successivamente sono stati assunti come cicli di riferimento durante le simulazioni numeriche.

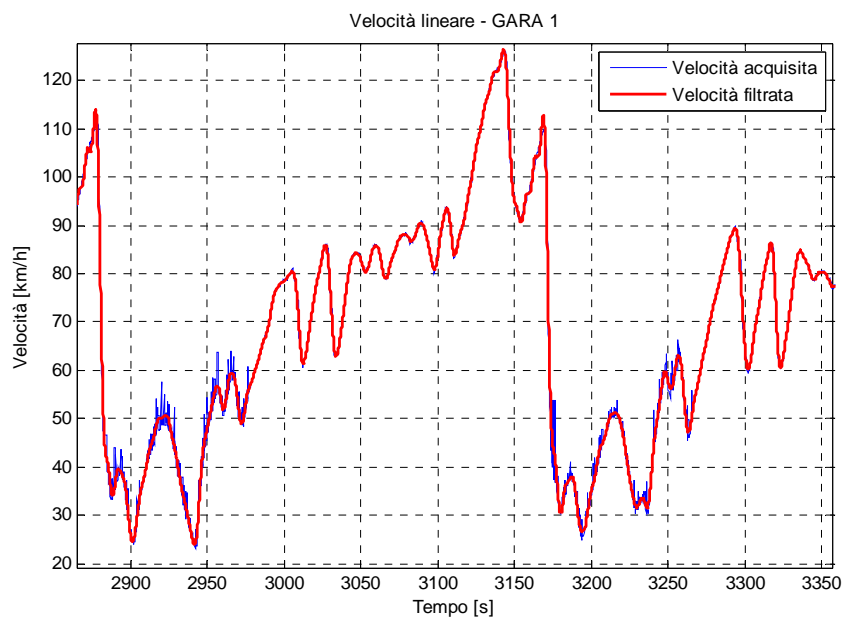


Figura 4.36 – Profilo di velocità

Come si può osservare dal grafico dello spettro del segnale di velocità di Figura 4.37, è stato necessario applicare un filtro ai segnali di velocità acquisiti, in quanto, soprattutto durante la marcia in modalità elettrica, essi risultano affetti da rumore.

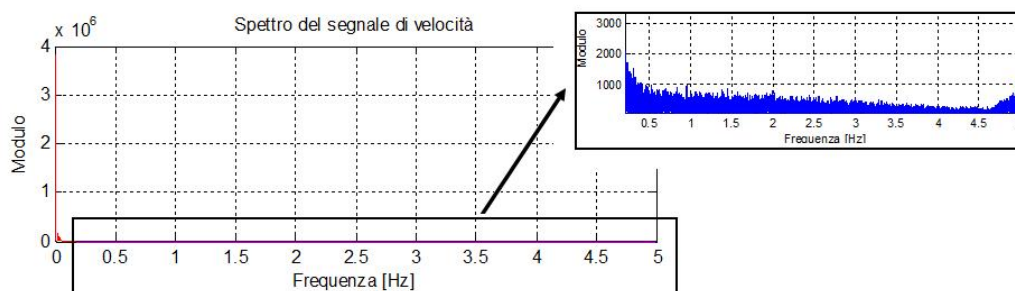


Figura 4.37 – Spettro segnale di Velocità

Applicando diverse tipologie di filtri si è notato che, non eseguendo alcun filtraggio sulla velocità di riferimento nel simulatore, si potevano ottenere errori molto ridotti, in termini di consumo di carburante ed utilizzo della batteria. Le grandezze osservate, riportavano però la medesima quantità di rumore presente nel segnale di velocità e ciò non rendeva possibile la visualizzazione degli andamenti. Al contrario, imponendo filtri sempre più selettivi, venivano eliminate le oscillazioni dovute ad armoniche di ordine superiore, ma allo stesso tempo si introducevano anche dei ritardi che portavano il simulatore a non riprodurre correttamente gli andamenti delle variabili di interesse.

Per questo motivo si è deciso di filtrare il segnale di velocità cercando il giusto compromesso tra l'eliminazione dei disturbi e l'introduzione dei ritardi.

Il simulatore, come già accennato, riceve in ingresso il profilo di velocità desiderato da utilizzare come riferimento nel blocco pilota. In Figura 4.36 viene mostrato l'andamento di un solo giro di pista effettuato in una delle quattro diverse manche disputate.

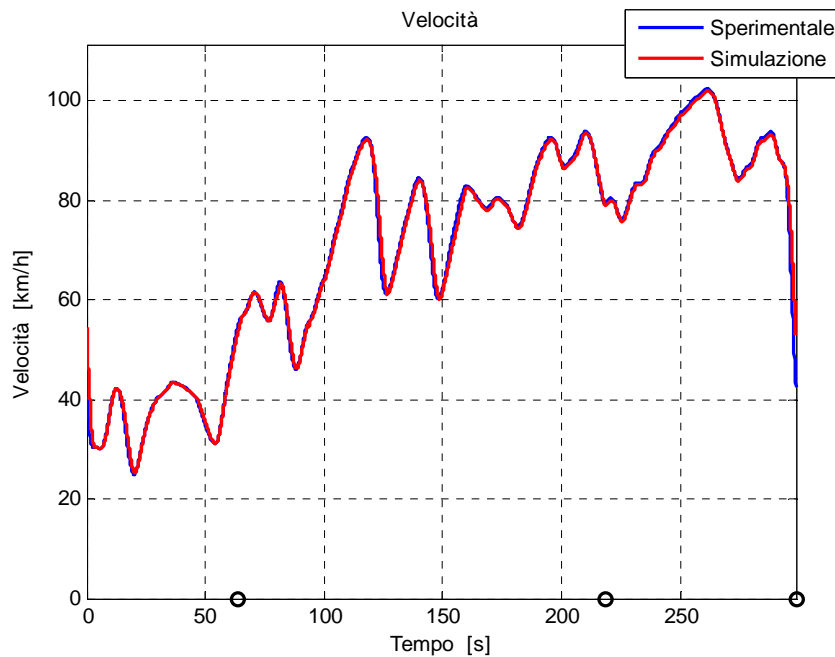


Figura 4.38 - Profilo di velocità (Manche 3 - Giro 11)

Come si può osservare dal grafico, l'andamento della velocità rilevato sperimentalmente viene perfettamente rimarcato dal simulatore. Grazie al controllo adattivo implementato nel simulatore si è stati in grado di ridurre al minimo le oscillazioni presenti durante la marcia in elettrico rispettando l'inseguimento di velocità desiderato.

Analogamente, risulta possibile analizzare gli andamenti delle velocità angolari del motore elettrico ed endotermico.

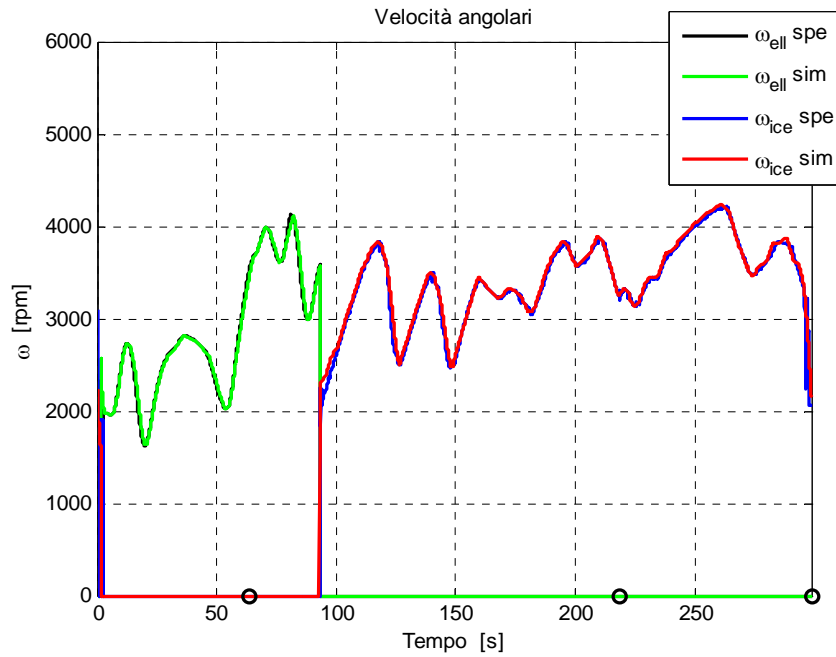


Figura 4.39 – Andamenti delle velocità angolari

Anche in questo caso gli andamenti vengono seguiti con buona approssimazione, risulta possibile notare un leggero errore nel momento in cui si passa dalla modalità elettrica a quella endotermica nell'intorno dei 95 s come mostrato in Figura 4.39. Questo errore può essere in parte dovuto al tipo di controllo effettuato che modifica i propri parametri proprio a seconda della modalità a cui si sta procedendo. Nell'intorno dei 95 s si ha appunto il passaggio dalla modalità elettrica a quella endotermica.

Passando alle variabili di batteria risulta di notevole interesse l'osservazione degli andamenti di tensione e corrente durante un singolo giro di pista.

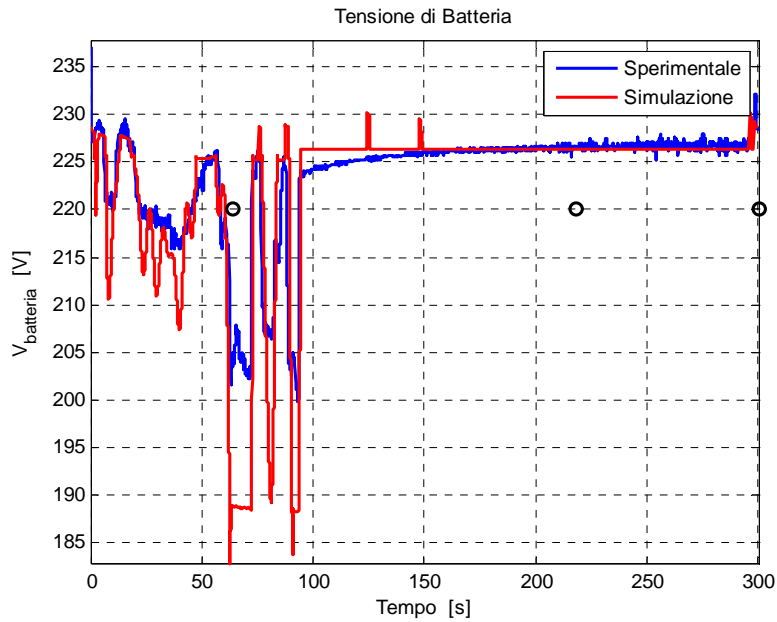


Figura 4.40 – Andamento della tensione di batteria

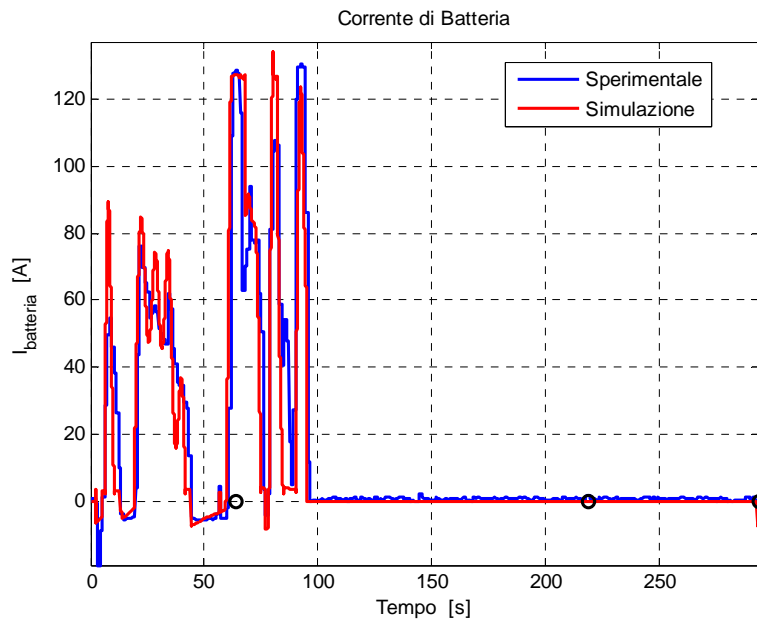


Figura 4.41 – Andamento della corrente di batteria

Risulta possibile notare dai grafici di Figura 4.40 e 4.41, come i profili di tensione e corrente vengano approssimati correttamente. Per quanto concerne le oscillazioni, queste sono giustificate, come già in precedenza evidenziato, dal fatto che il segnale di riferimento utilizzato è stato filtrato in quanto presentava un notevole disturbo soprattutto nei tratti in cui si utilizzava il motore elettrico. Se si fosse utilizzato un filtro più selettivo, il simulatore non avrebbe riprodotto queste oscillazione ma i due segnali (sperimentale, simulazione) sarebbero risultati sfasati. Si è quindi cercato un buon compromesso tra l'introduzione dei ritardi e la nascita di sovralongazioni e/o oscillazioni.

Occorre però notare che anche se nel simulatore sono presenti degli errori di approssimazione, la potenza e di conseguenza l'utilizzo percentuale della batteria risultano comunque seguiti con una notevole precisione, come mostrato nelle Figure seguenti.

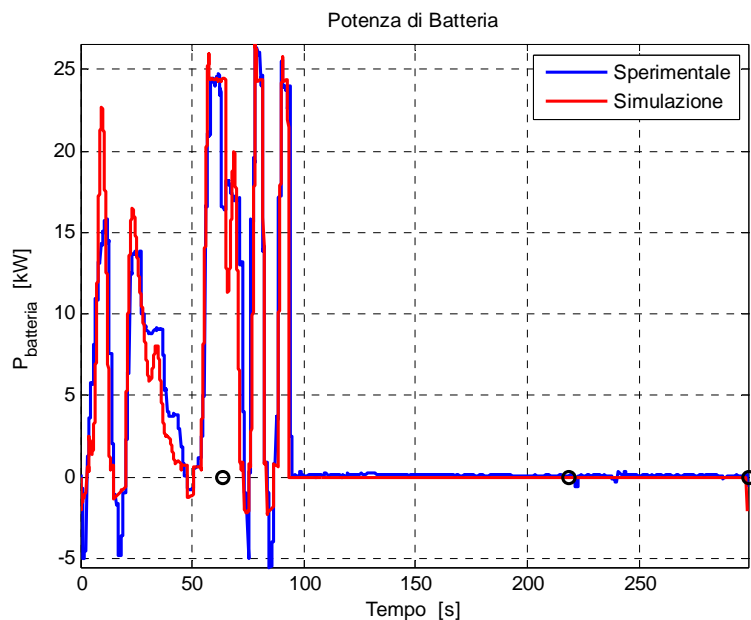


Figura 4.42 – Andamento della potenza di batteria

Anche l'utilizzo percentuale della batteria viene rimarcato con buona approssimazione e può quindi essere ritenuto corretto.

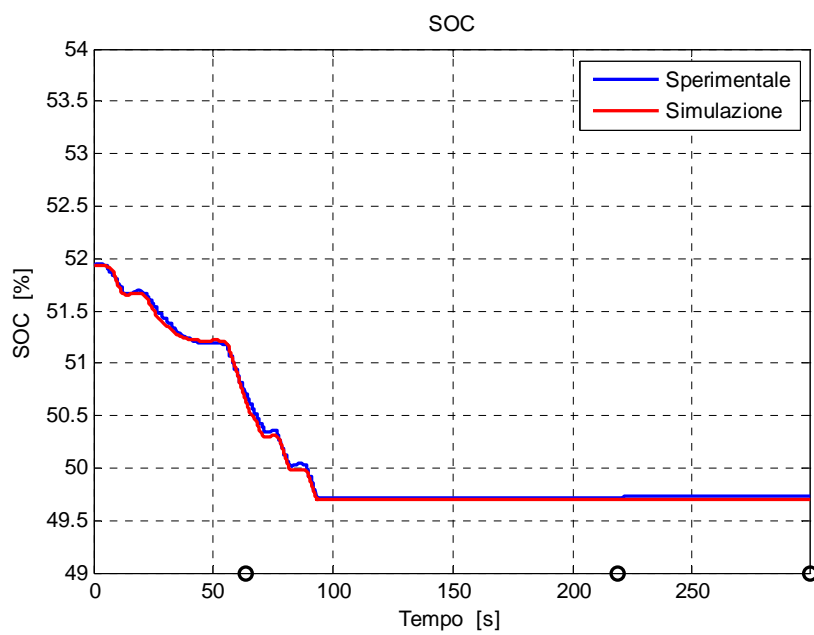


Figura 4.43 – Utilizzo percentuale della batteria

Successivamente, vengono valutati gli andamenti delle variabili di interesse inerenti al motore endotermico, ossia il pedale del acceleratore relativo al solo motore endotermico, la rispettiva coppia motrice generata ed il consumo istantaneo di carburante.

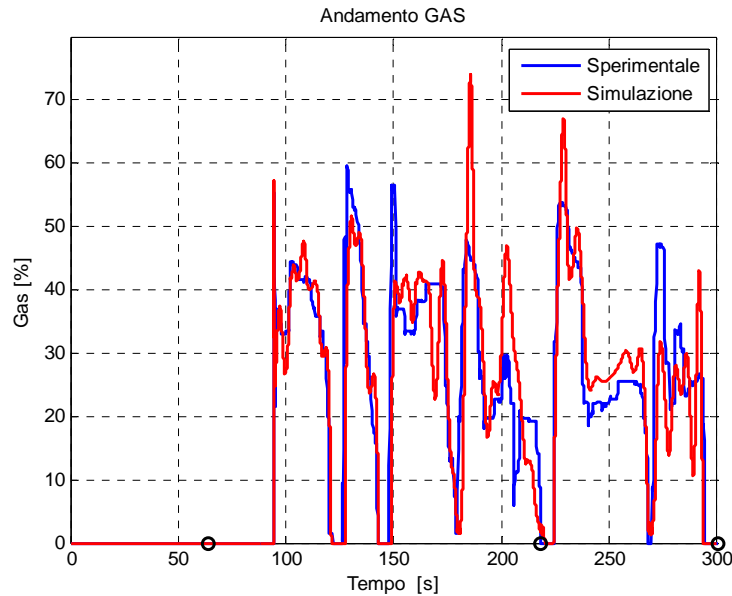


Figura 4.44 – Andamento del pedale del gas

Il pedale dell'acceleratore, riportato in Figura 4.44 e proveniente dal gestore di bordo viene inviato al blocco motore ICE, dove per mezzo delle corrispondenti mappe, viene determinata la coppia motrice e il consumo istantaneo.

In particolare, come si osserva dal grafico di Figura 4.45, la coppia ottenuta tramite simulazione sale più bruscamente rispetto alla realtà, questo è dovuto ad un difetto nella mappatura del motore a basso grado di ammissione. La causa di ciò è da ricercarsi nella scarsità di informazioni disponibili al momento della creazione della mappatura in tali condizioni.

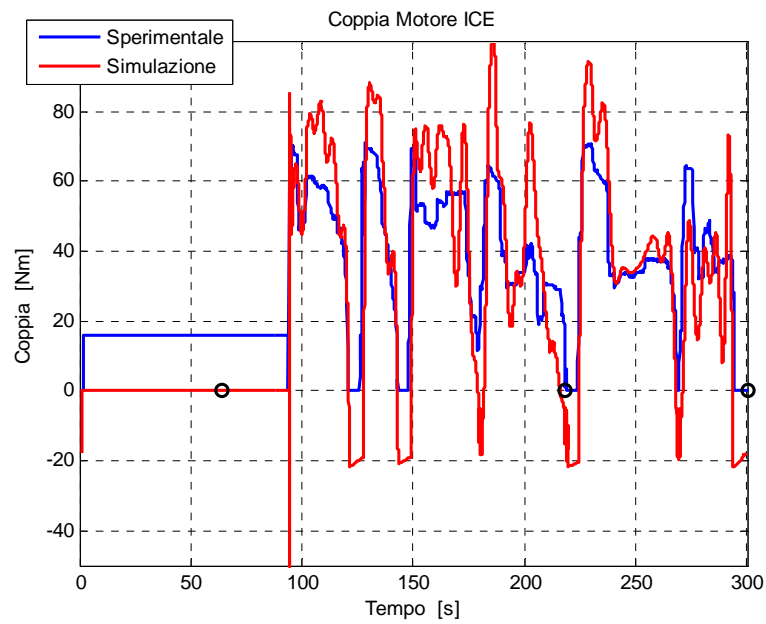


Figura 4.45 – Andamento della coppia motrice

Per lo stesso motivo anche il consumo di carburante presenta dei tratti in cui sale più bruscamente rispetto ai dati sperimentali.

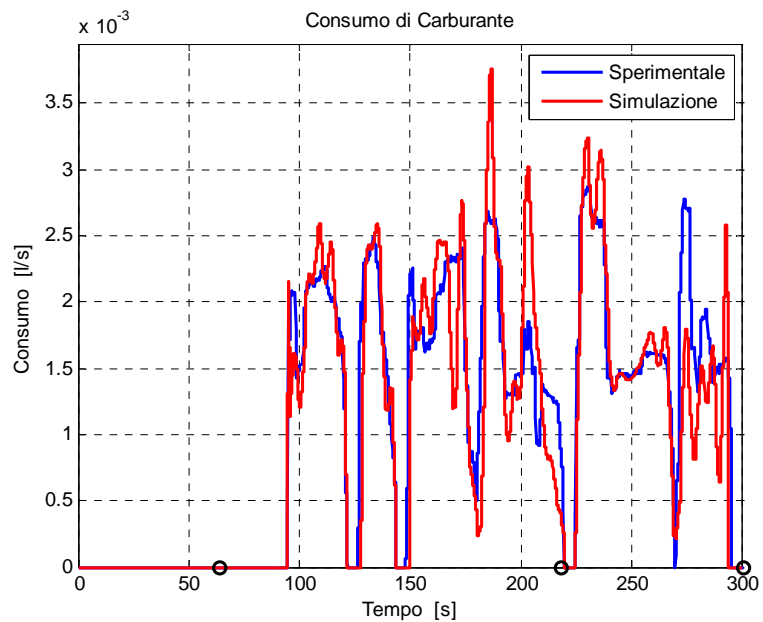


Figura 4.46 – Andamento del consumo istantaneo di carburante

Una volta verificati che gli andamenti delle singole variabili fossero seguiti correttamente, si sono valutati gli errori prodotti dal simulatore in termini di consumo di carburante ed utilizzo della batteria.

In primo luogo si sono valutati i parametri considerando un singolo giro di ogni gara.

DATI di Confronto		GARA 1 - Giro Singolo		GARA 2 - Giro Singolo		GARA 3 - Giro Singolo		GARA 4 - Giro Singolo	
		Sperimentale	Simulazione	Sperimentale	Simulazione	Sperimentale	Simulazione	Sperimentale	Simulazione
Consumo specifico	[l/km]	0,0683	0,0681	0,0594	0,0585	0,0564	0,0569	0,0550	0,0528
Energia specifica	[Wh/km]	40,8841	38,8195	46,4375	43,7161	41,7733	40,6057	39,9589	38,1067

Tabella 4.9 – Dati raccolti su singolo giro

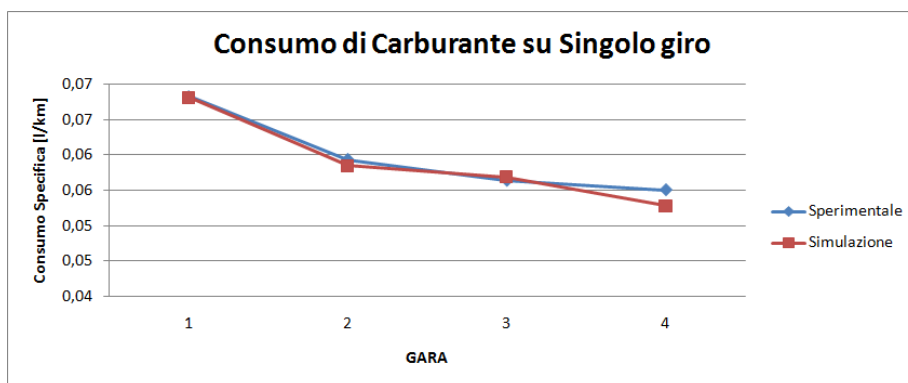


Figura 4.47 – Consumo di carburante

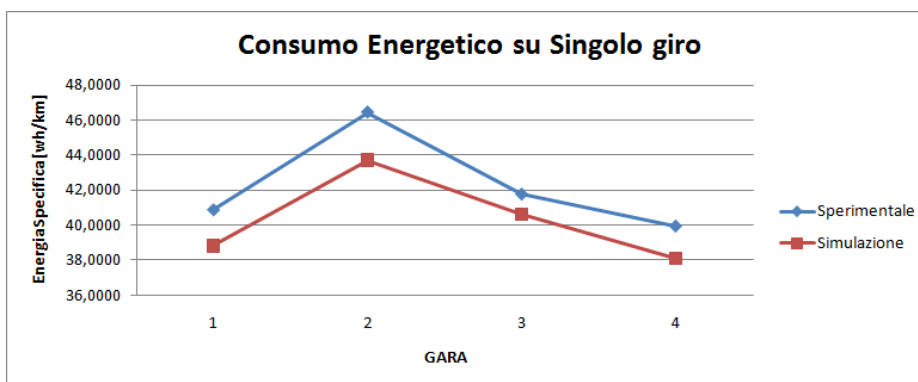


Figura 4.48 – Consumo energetico

I consumi di carburante riscontrati su un singolo giro di pista, considerando le 4 gare disputate risultano molto simili rispetto a quelli sperimentali, mentre i consumi energetici in batteria risultano superiori.

Successivamente, si sono valutati i parametri lungo tutta la gara completa composta da 18 giri di pista.

		GARA 1 - Gara Completa		GARA 2 - Gara Completa		GARA 3 - Gara Completa		GARA 4 - Gara Completa	
DATI di Confronto		Sperimentale	Simulazione	Sperimentale	Simulazione	Sperimentale	Simulazione	Sperimentale	Simulazione
Consumo specifico	[l/km]	0,0684	0,0679	0,0617	0,0626	0,0603	0,0602	0,0587	0,0555
Energia specifica	[Wh/km]	45,2243	40,6270	43,7740	41,9921	43,2782	41,4455	41,4653	37,7762

Tabella 4.10 – Dati raccolti su gara completa (18 giri)

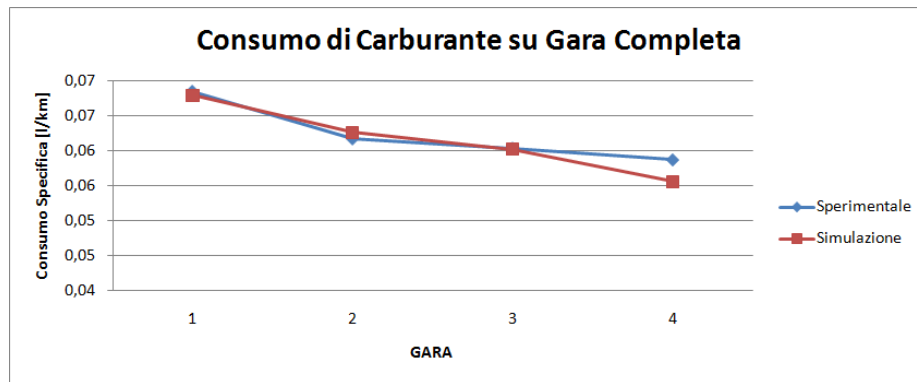


Figura 4.49 – Consumo di carburante

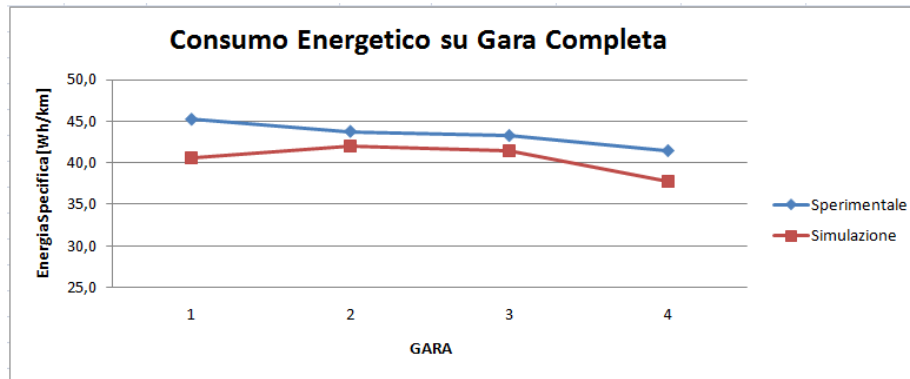


Figura 4.50 – Consumo energetico

Anche considerando le singole gare complete, ossia composte da 18 giri ciascuna, i consumi di carburante risultano paragonabili, mentre i risultati ottenuti mediante simulatore e riguardanti i consumi energetici in batteria risultano, come nel caso del giro singolo, superiori rispetto a quelli sperimentali.

Infine per completezza si sono valutati gli errori percentuali, compiuti dal simulatore rispetto ai dati ricavati sperimentalmente.

GIRO SINGOLO	GARA 1	GARA 2	GARA 3	GARA 4
Errore Consumi [%]	0,2478	1,4442	0,9080	4,0789
Errore Energetico [%]	5,0499	5,8603	2,7950	4,6355
GARA COMPLETA	GARA 1	GARA 2	GARA 3	GARA 4
Errore Consumi [%]	0,7833	1,4721	0,2456	5,3374
Errore Energetico [%]	10,1655	4,0706	4,2347	8,8968

Tabella 4.11 – Errori percentuali

Come si nota dal grafico di Figura 4.49 gli errori percentuali sul consumo di carburante risultano, sia nel caso di giro singolo che nel caso gara completa inferiori al 1.5% ad eccezione della gara 4 in cui invece l'errore risulta più elevato e pari al 5% .

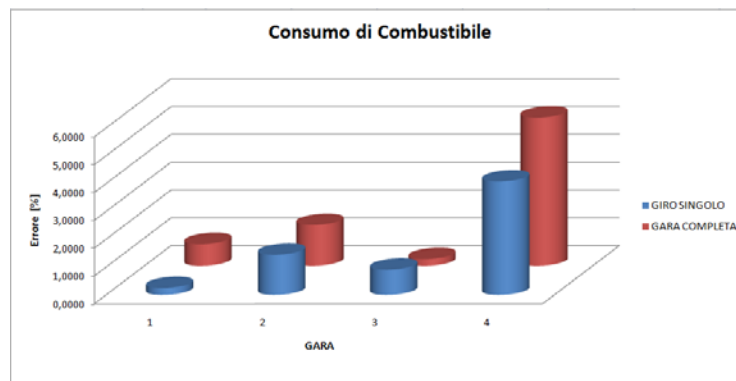


Figura 4.51 – Errore percentuale consumo di carburante

Al contrario gli errori in batteria risultano più elevati come si nota dal grafico di Figura 4.50.

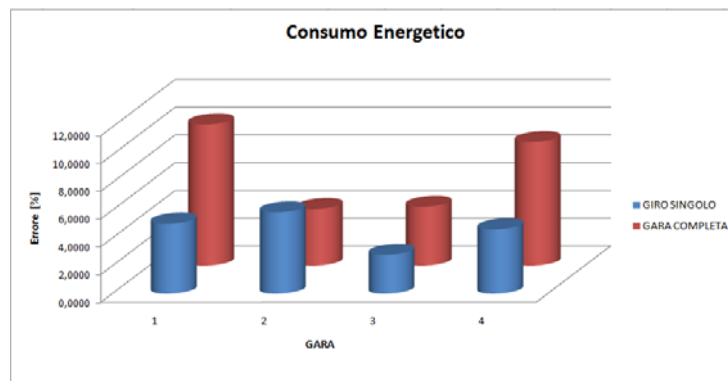


Figura 4.52 – Errore percentuale consumo energetico

L'errore maggiore risulta essere quindi quello sui consumi energetici in batteria e può essere in parte dovuto al fatto che la frenata rigenerativa, che permetteva la ricarica del pacco batterie a bordo della vettura, è stata valutata mediamente ed in parte dovuto al rumore presente nel segnale della velocità di riferimento nel tratto percorso in elettrico.

Capitolo 5

Risultati numerici

5.1 Simulazione strategie di confronto

Dovendo confrontare i benefici ottenuti mediante l'inserimento del modulo di supercondensatori, in termini di EEC, ossia in termini di consumo energetico equivalente, come ampiamente spiegato nel paragrafo 3.2 inerente al calcolo dei consumi energetici equivalenti, si sono effettuate numerose prove in differenti configurazioni.

Infatti, in primo luogo si sono eseguite simulazioni utilizzando i supercondensatori in parallelo con il modulo di batteria agli ioni di litio, ossia quello presente sul prototipo bimodale utilizzato nelle diverse gare disputate nel circuito di Monza. Successivamente si è ridimensionato il modulo batteria, rendendolo conseguentemente più leggero, e si sono valutati i benefici in termini di consumo di carburante ed utilizzo energetico.

Inoltre come precedentemente spiegato, al fine di ottimizzare l'utilizzo dei supercondensatori, a differenza della gara disputata nell'autodromo di Monza, durante le simulazioni, si è attivata la frenata rigenerativa. Si è quindi valutato il consumo globale nelle simulazioni di confronto senza supercondensatori, atti-

vando la massima frenata rigenerativa possibile. In questo caso il consumo energetico in batteria risultava nettamente inferiore rispetto al precedente riscontrato sperimentalmente, quindi, al fine di mantenere la medesima configurazione avuta in gara si è deciso di ritardare l'accensione del motore endotermico, aumentando di conseguenza l'utilizzo di quello elettrico.

Mediante questa configurazione di base si sono quindi valutati i benefici ottenuti mediante l'inserimento di un modulo di supercondensatori che lavori in parallelo con le diverse batterie considerate.

La simulazione di confronto, presenta quindi i consumi energetici e le corrispondenti ricariche riportate in Tabella.

GARA	Δ SOC [%]	Energia [Wh]	Ricarica [%]	Energia [Wh]
1	-33,01	-3664,00	15,71	1743,81
2	-37,37	-4148,35	32,56	3614,16
3	-35,12	-3898,42	26,31	2920,41
4	-34,35	-3812,72	-	-

Tabella 5.1 - Utilizzo Batteria e Ricarica (Simulazione)

Viene presentato anche l'andamento dell'utilizzo energetico percentuale in batteria e la quota parte di energia effettivamente utilizzata.

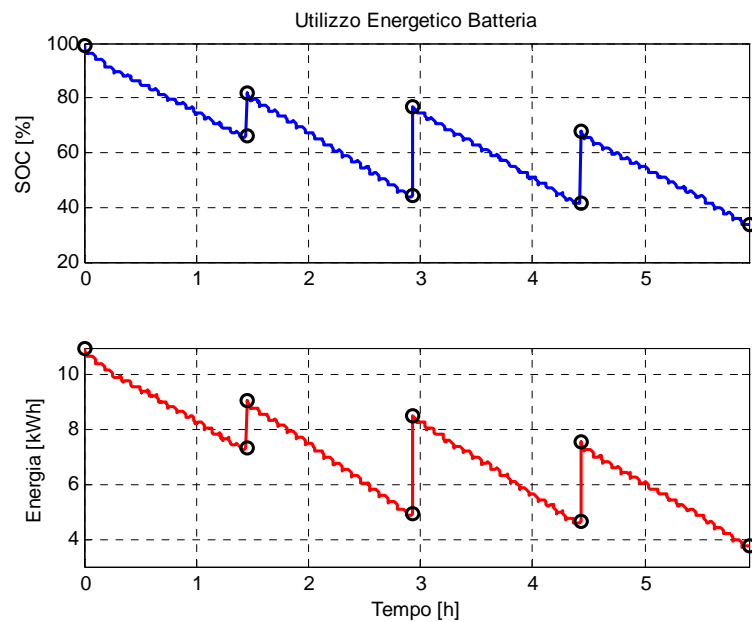


Figura 5.1 – Utilizzo Energetico in Batteria (Simulazione di Confronto)

L'utilizzo energetico in batteria, ricavato mediante simulazioni, risulta inferiore rispetto a quello ottenuto dai dati sperimentali, ma mantiene comunque la medesima logica utilizzata in gara, terminando con il quantitativo minimo di energia in batteria.

5.2 Risultati modulo batteria ioni di litio – supercapacità

Vengono, in questo paragrafo, presentati gli andamenti delle variabili elettriche ed endotermiche, ricavate mediante simulazioni numeriche ed effettuate con e senza l'utilizzo di supercondensatori in parallelo con il modello di batteria originale. Al fine di rendere possibile la comprensione degli andamenti delle singole variabili di interesse, vengono mostrati gli andamenti riguardanti un singolo giro del circuito di Monza. Vengono inoltre identificati per mezzo di cerchi neri i tre settori in cui è stato diviso il circuito. Il profilo di velocità sperimentale inserito come riferimento all'interno del simulatore viene ricalcato perfettamente in entrambe le simulazioni.

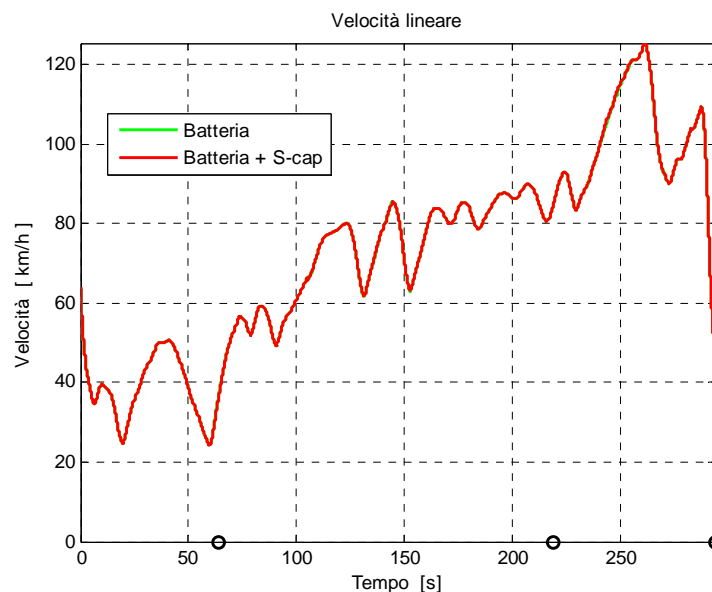


Figura 5.2 – Andamento della Velocità (Gara 1, Giro 11)

Risulta utile notare come il profilo di velocità venga perfettamente seguito anche nel caso in cui i supercondensatori alimentino il motore elettrico al fine di ridur-

re l'utilizzo di quello endotermico. Non si osservano infatti nel terzo settore cadute di velocità.

Risulta utile ricordare che, come anche presentano in Figura 5.3, il primo settore, ossia la tratta urbana, viene eseguito in modalità elettrica, si può quindi subito osservare come la potenza richiesta in batteria sopra la soglia massima venga fornita dal modulo di supercondensatori.

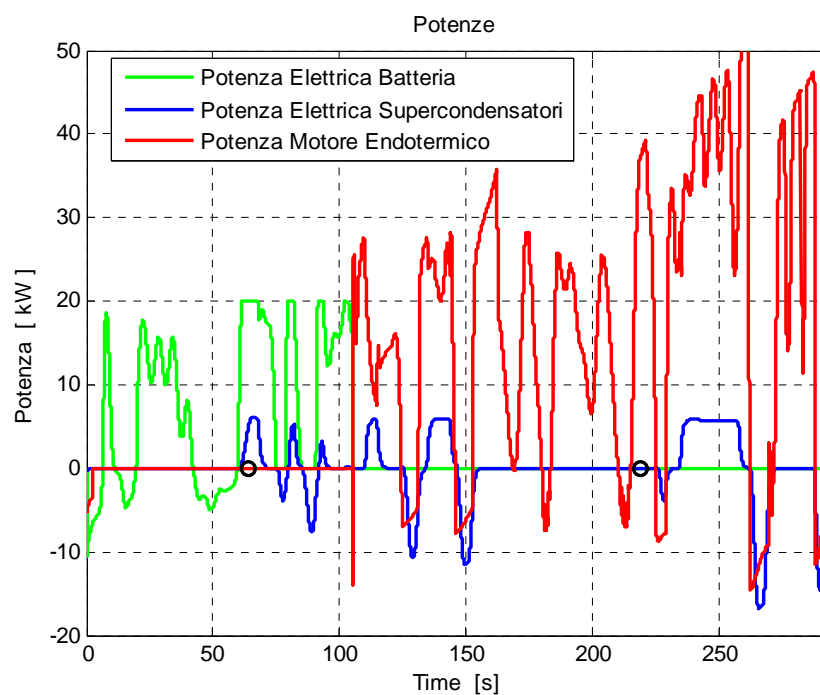


Figura 5.3 – Riepilogo : Potenze in gioco

Il settore centrale (tratta extraurbana) viene percorso in entrambe le modalità, in questo caso si nota come i supercondensatori intervengano sia in aiuto della batteria che fornendo potenza all'azionamento elettrico, al fine di diminuire la richiesta di coppia del motore endotermico. Infine il tratto autostradale viene completamente percorso in modalità endotermica.

In primo luogo, vengono presentati gli andamenti delle variabili elettriche inerenti al pacco batteria ioni-litio, senza e con l'applicazione del modulo di supercondensatori. Come si può osservare dai grafici sottostanti la richiesta di potenza superiore alla soglia massima viene soddisfatta dai supercondensatori, diminuendo di conseguenza l'utilizzo della batteria.

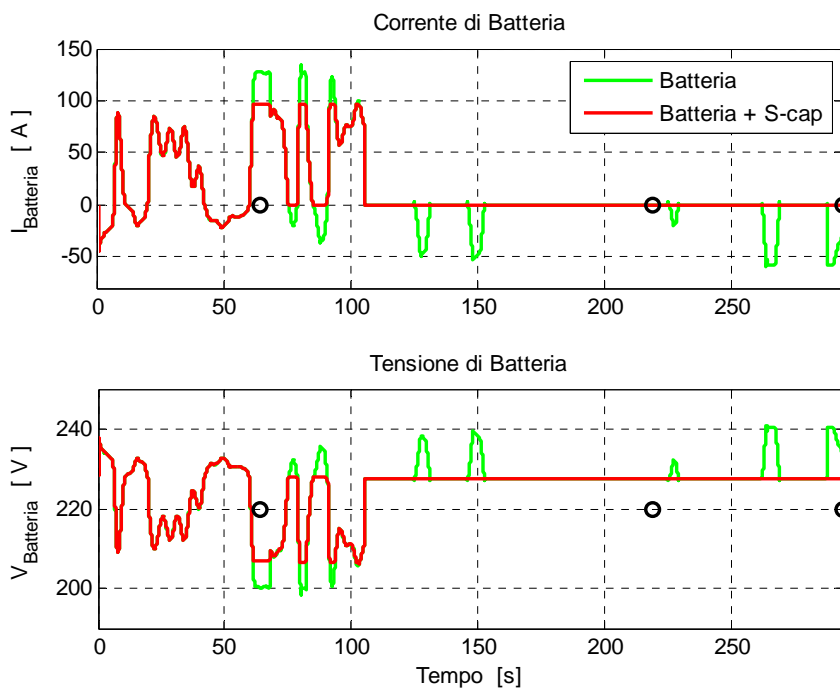


Figura 5.4 – Andamento Variabili Elettriche

Inoltre, al contrario della simulazione senza supercondensatori, in cui la corrente negativa veniva indirizzata in batteria rispettando il limite sulla corrente massima negativa ammissibile, nella simulazione con ultracapacitori la corrente negativa viene utilizzata per ricaricare i supercondensatori.

Come anticipato, l'utilizzo della batteria nel secondo caso (simulazione con supercondensatori) risulta superiore. In realtà l'utilizzo vero e proprio della batteria risulta inferiore avendo eliminato la quota parte dovuta ai picchi di potenza, ma vengono utilizzate tutte le frenate in elettrico al fine di ricaricare i supercondensatori che si scaricano, e conseguentemente si ricaricano, anche nel secondo e terzo tratto in cui intervengono in aiuto al motore endotermico.

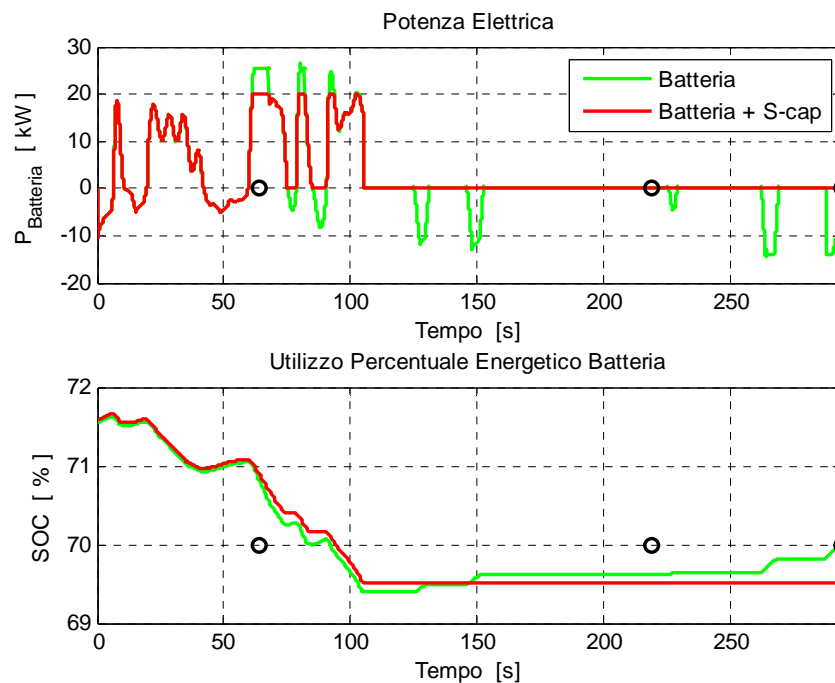


Figura 5.5 – Andamento Variabili Elettriche

Per queste ragioni l'utilizzo della batteria nel caso si considerino in parallelo i supercondensatori risulta superiore, rispetto alla simulazione precedente.

Passando alle variabili attinenti il motore endotermico, si può osservare dal grafico di Figura 5.6, come l'intervento dei supercondensatori durante la marcia in endotermico ne diminuisca l'utilizzo.

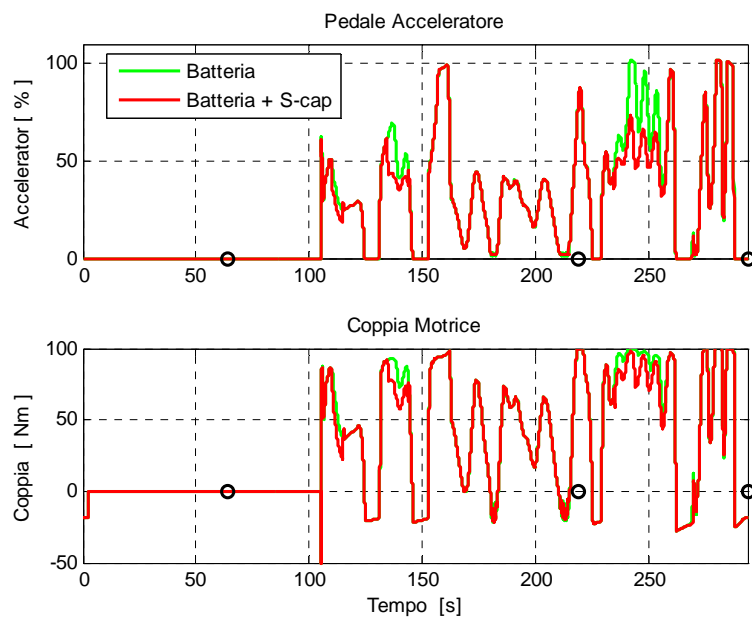


Figura 5.6 – Andamenti Variabili Endotermiche

Come ampiamente spiegato nel capitolo inerente al simulatore numerico, il motore endotermico risulta modellizzato per mezzo di mappe sperimentali. Una volta ripartito dal gestore di bordo il segnale dell'acceleratore proveniente dal blocco pilota, tra motore elettrico ed endotermico, viene diminuita la coppia motrice e conseguentemente i consumi.

Come anticipato, anche il consumo di carburante risulta inferiore rispetto alla simulazione in cui non vengono considerati i supercondensatori.

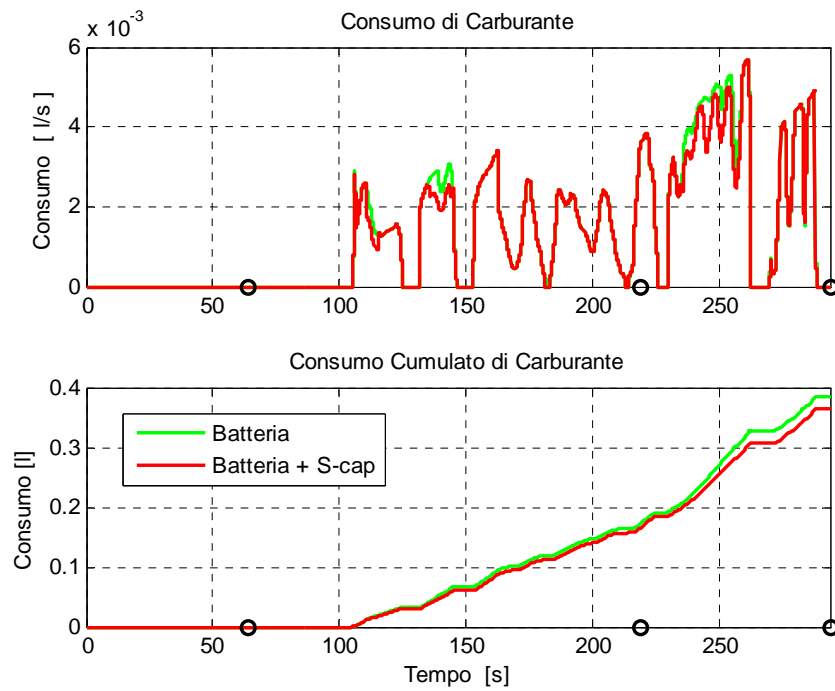


Figura 5.7 – Andamenti Variabili Endotermiche

Si rivolge particolare attenzione alle variabili elettriche inerenti il banco di supercondensatori. Nel primo settore in cui i supercondensatori non vengono utilizzati, tensione e corrente risultano costanti. In realtà il grafico non rende apprezzabile il fatto che i supercondensatori, nel tempo, presentano una caduta di tensione, anche se non vengono utilizzati. Questa perdita di energia nel banco di ultracapacitori risulta essere causata dalla presenza della resistenza di serie, presente nel modello dei supercondensatori.

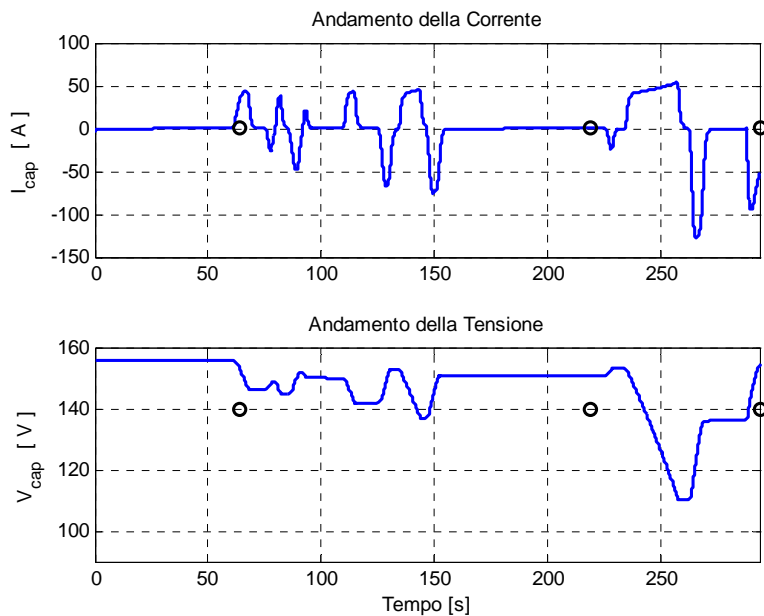


Figura 5.8 – Andamento Variabili Supercondensatore

Nella prima parte del secondo tratto, zona percorsa ancora con il motore elettrico, viene fornita potenza dai supercondensatori per far fronte alle richieste di picco di potenza dell'azionamento elettrico. Mentre nell'ultimo settore, viene richiesta potenza (e quindi corrente) al fine di ridurre l'utilizzo del motore a combustione interna. Inoltre si può osservare come il limite di corrente massima sia

notevolmente superiore rispetto a quello presente invece in batteria. In entrambi i casi viene comunque rispettato il limite fisico di corrente dell'inverter.

Infine osservando il grafico di Figura 5.9, risulta possibile capire come una richiesta di potenza positiva ai supercapacitori, comporti una diminuzione dell'energia contenuta nel banco.

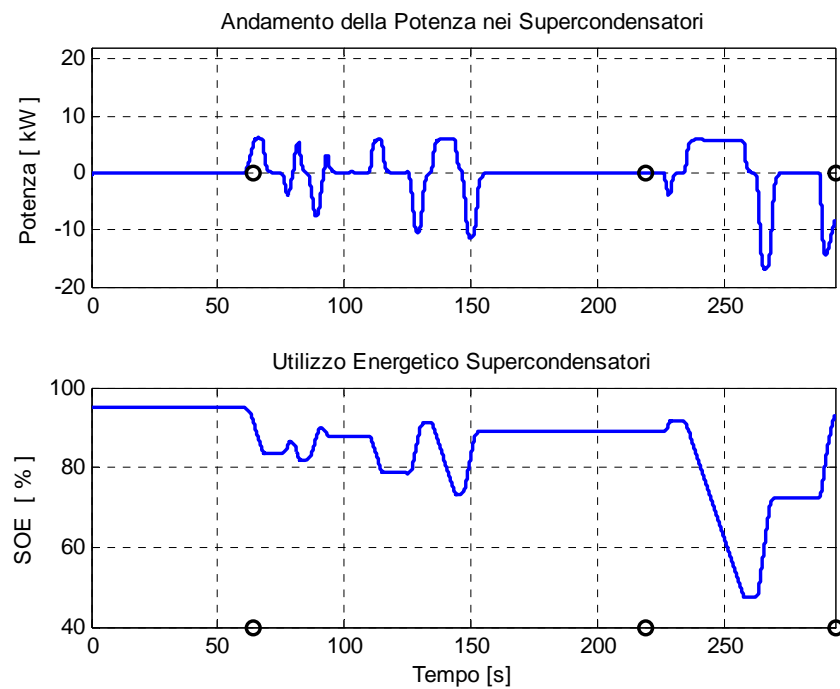


Figura 5.9 – Andamento Variabili Supercondensatore

Si presentano, inoltre, gli andamenti ricavati mediante le simulazioni numeriche delle potenze in gioco durante una gara completa, comprensiva di 18 giri di pista.

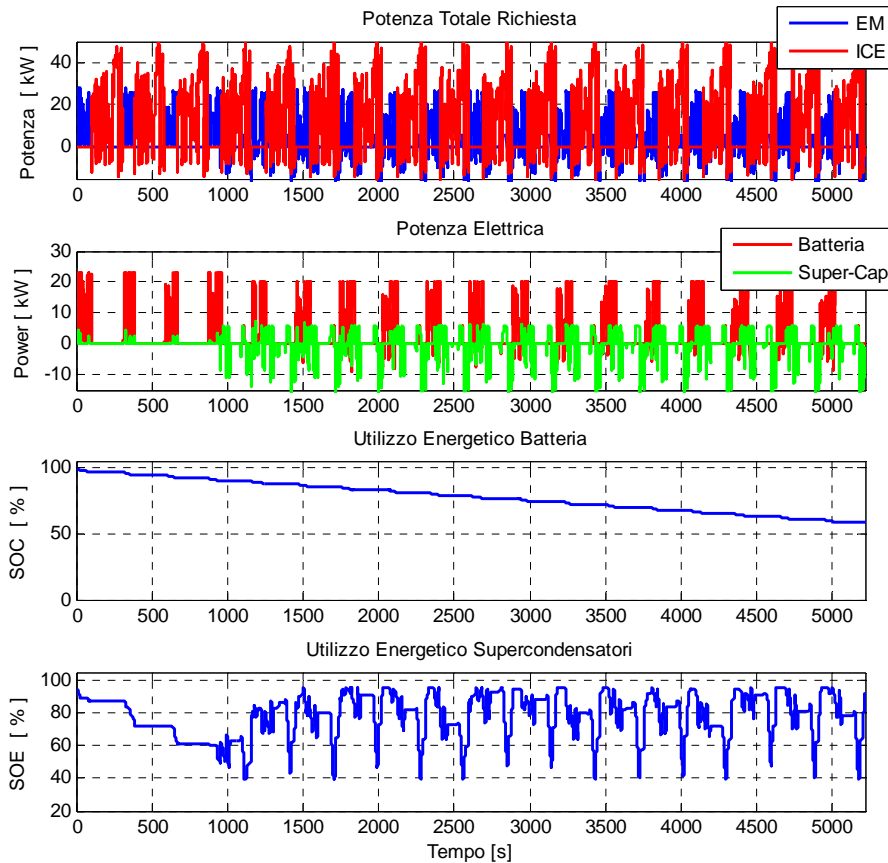


Figura 5.10 – Andamento Potenze (Gara 1)

Risulta utile osservare come, durante i primi giri di pista della prima gara, momento in cui non è possibile effettuare la frenata rigenerativa in quanto i serbatoi energetici risultano completamente carichi, i supercondensatori, modificano la loro logica di funzionamento. Viene infatti alzato il limite di potenza massima in

batteria e disinserito l'aiuto elettrico fornito al motore endotermico al fine di gestire la modesta energia presente nei supercondensatori su tutti i primi giri.

Al contrario, durante la seconda gara, come mostrato in Figura 5.11, partendo con un quantitativo di energia in batteria inferiore, viene abilitato fin dal primo giro la ricarica rigenerativa in frenata e di conseguenza anche l'utilizzo dei supercondensatori.

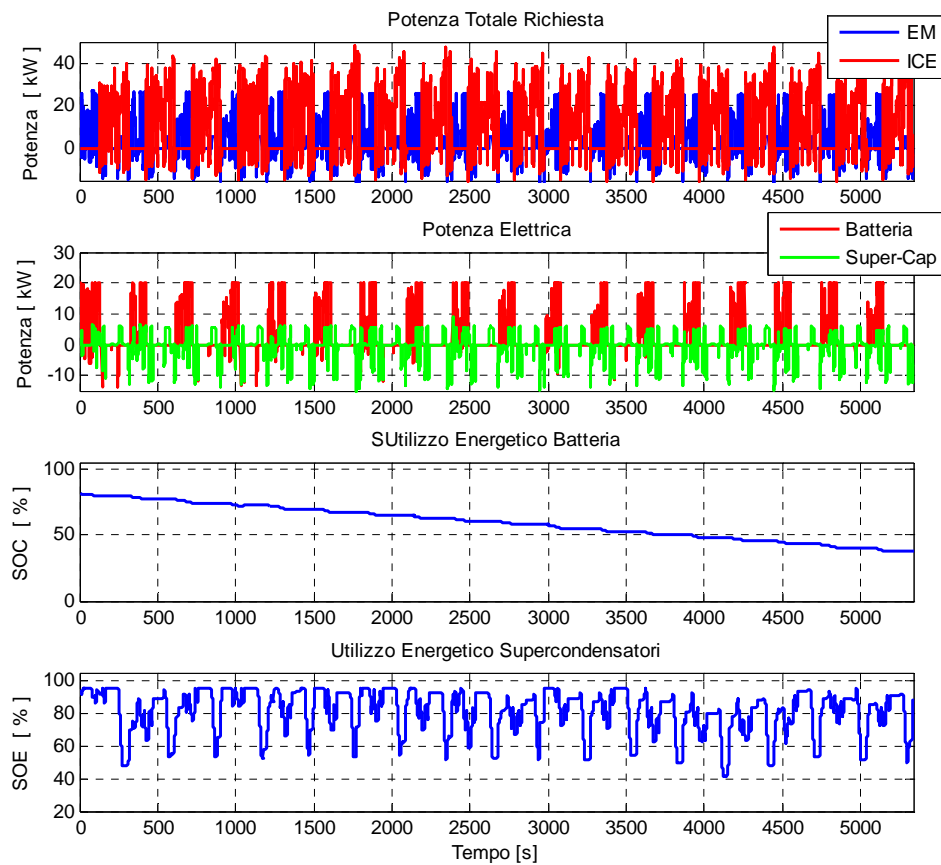


Figura 5.11 – Andamento Potenze (Gara 2)

Ovviamente anche le successive gare (gara 3 e gara 4) presentano i medesimi andamenti riportati in Figura 5.11 ad esclusione del valore iniziale di SOC.

Vengono quindi riassunti in Tabella 5.2 i calcoli eseguiti per valutare i guadagni relativi alle simulazioni effettuate su un singolo giro di ogni gara.

		GARA 1 - Giro singolo		GARA 2 - Giro singolo	
		<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>	<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>
Consumo Carb.	[l]	0,3843	0,3641	0,3218	0,3075
Consumo Eq.	[Wh]	3420,4480	3240,0450	2864,1980	2736,5720
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3978	0,3724	0,3351	0,3163
Consumo En. Batteria	[Wh]	173,1045	227,4612	241,6803	262,2930
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	1,6681	0,0000	16,6972
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0201	0,0263	0,0283	0,0322
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,4179	0,3987	0,3634	0,3485

		GARA 3 - Giro singolo		GARA 4 - Giro singolo	
		<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>	<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>
Consumo Carb.	[l]	0,3151	0,2994	0,2934	0,2842
Consumo Eq.	[Wh]	2804,1230	2664,2150	2611,1710	2529,0240
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3281	0,3079	0,3049	0,2919
Consumo En. Batteria	[Wh]	239,4936	261,4161	210,5892	234,2433
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	21,7883	0,0000	0,0000
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0280	0,0327	0,0246	0,0270
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,3561	0,3406	0,3295	0,3190

Tabella 5.2 – EEC calcolato su singolo giro

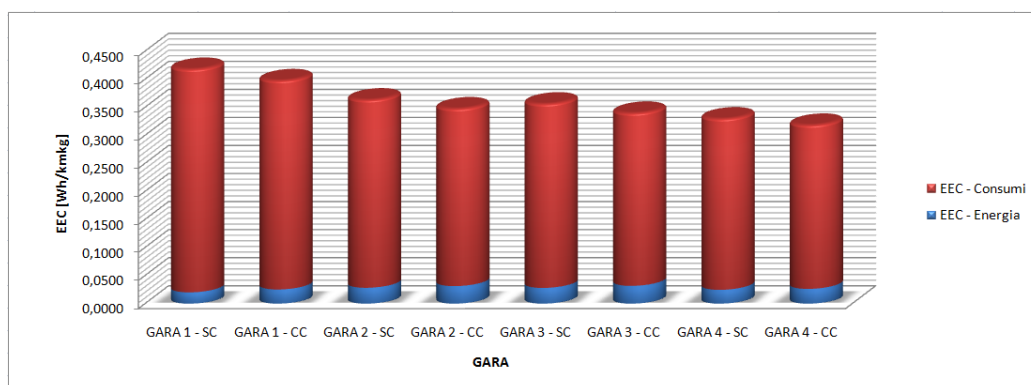


Figura 5.12 – EEC (Singolo giro) [Wh/kgkm]

Successivamente, si sono considerati tutti i 18 giri costituenti una gara complessiva.

		GARA 1 - Gara Completa		GARA 2 - Gara Completa	
		Sim. Senza Supercap	Sim. Con Supercap	Sim. Senza Supercap	Sim. Con Supercap
Consumo Carb.	[l]	6,9242	6,6347	6,1599	5,9040
Consumo Eq.	[Wh]	61625,3800	59048,8300	54823,1100	52545,6000
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3990	0,3778	0,3556	0,3368
Consumo En. Batteria	[Wh]	3663,9990	4482,8682	4148,3475	4836,1923
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	7,0452	0,0000	10,7184
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0237	0,0287	0,0269	0,0311
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,4227	0,4065	0,3825	0,3679

		GARA 3 - Gara Completa		GARA 4 - Gara Completa	
		Sim. Senza Supercap	Sim. Con Supercap	Sim. Senza Supercap	Sim. Con Supercap
Consumo Carb.	[l]	6,0395	5,7723	5,5272	5,3776
Consumo Eq.	[Wh]	53751,5500	51373,4700	49192,0800	47860,6400
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3488	0,3291	0,3195	0,3072
Consumo En. Batteria	[Wh]	3898,4199	4747,0038	3812,7168	4239,0456
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	9,9091	0,0000	10,6057
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0253	0,0305	0,0248	0,0273
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,3740	0,3596	0,3442	0,3345

Tabella 5.3 - EEC calcolato su gara completa

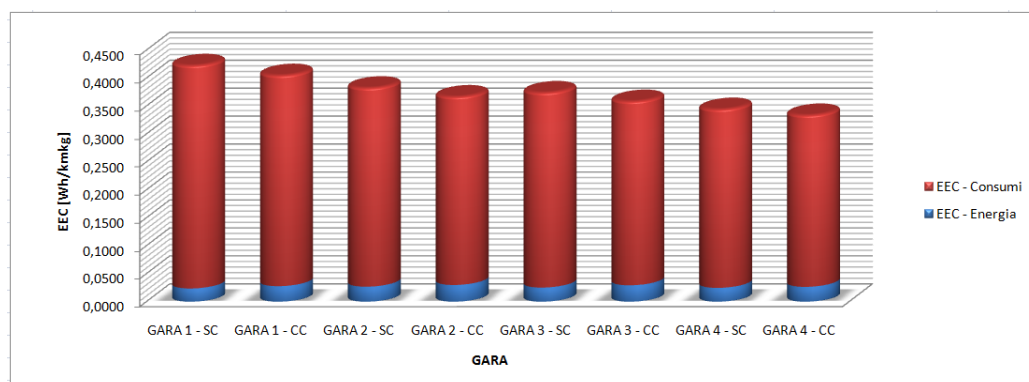


Figura 5.13 - EEC (Gara singola) [Wh/kgkm]

Infine vengono mostrati i guadagni percentuali calcolati nelle situazioni sopra esposte.

		GARA 1 - Giro singolo	GARA 2 - Giro singolo	GARA 3 - Giro singolo	GARA 4 - Giro singolo
Risparmio - Giro singolo	[%]	4,588071	4,083996	4,341806	3,204630
		GARA 1 - Completa	GARA 2 - Completa	GARA 3 - Completa	GARA 4 - Completa
Risparmio- Gara Completa	[%]	3,826961	3,825391	3,855687	2,835548

Tabella 5.4 - Risparmio percentuale

Si può subito osservare come i guadagni calcolati su un singolo giro siano più elevati rispetto a quelli calcolati su una gara completa. Questo è dovuto al fatto che la logica di controllo implementata su un singolo giro di pista viene successivamente riprodotta sui 18 giri che però non risultano essere coincidenti.

Successivamente, al contrario di quello che ci si aspetta, si può notare come il guadagno ottenuto durante la prima gara risulti superiore rispetto ai successivi, nonostante il fatto che nei primi giri di gara 1 non risulti possibile effettuare la ricarica rigenerativa e quindi si disattivi l'utilizzo dei supercondensatori. In aggiunta il guadagno percentuale risulta assottigliarsi da gara 1 a gara 4.

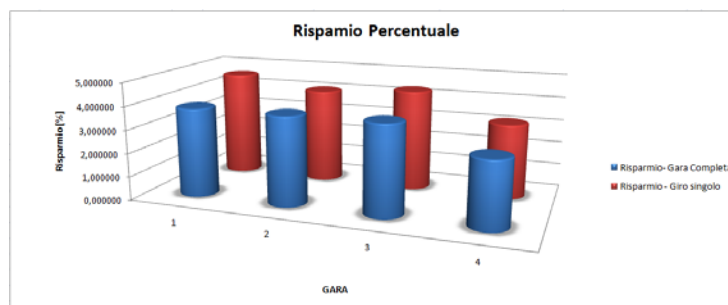


Figura 5.14 - Risparmio percentuale

Questa diminuzione non risulta imputabile ad un mal funzionamento della logica che regola i supercondensatori, ma al fatto che il pilota non fosse a conoscenza del circuito in questione. In gara 1, infatti, le frenate risultano più brusche e numerose rispetto alle seguenti, eseguite nelle gare successive, in cui il pilota ha aumentato la propria esperienza di guida.

Infine viene valutato il guadagno percentuale ottenuto considerando l'intera gara, composta dalle 4 manche (18 giri ciascuna).

In questo caso oltre ai consumi calcolati sulle singole manche, viene considerata anche l'energia iniziale presente a bordo del veicolo. Nel primo caso si considera solo l'energia contenuta nella batteria, mentre nel secondo caso si aggiunge anche quella contenuta nel modulo di supercondensatori.

	EEC consumi	EEC batteria	EEC ricarica	EEC totale
	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]
Energia iniziale	-	-	-	0,071992613
GARA 1	0,398965108	0,023720872	0,013526933	0,436212913
GARA 2	0,355620979	0,026909079	0,027953854	0,410483913
GARA 3	0,348754885	0,025294024	0,022876897	0,396925806
GARA 4	0,319468339	0,024760943	0	0,344229282
				1,6598

Tabella 5.5 – Simulazioni senza Supercondensatori

	EEC consumi	EEC batteria	EEC ricarica	EEC totale
	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]
Energia iniziale	-	-	-	0,071742635
GARA 1	0,377784257	0,028725694	0,022630442	0,429140393
GARA 2	0,33682718	0,031069609	0,022630442	0,390527231
GARA 3	0,329149264	0,030477489	0,022630442	0,382257195
GARA 4	0,307192225	0,027276272	0	0,334468497
				1,6081

Tabella 5.6 – Simulazioni con Supercondensatori

Inoltre, vengono considerate anche le ricariche effettuate tra una manche e la successiva, considerando come rendimento di carica : $\eta = 0.85$.

Il risparmio complessivo risulta quindi :

$$R = 100 \cdot \frac{EEC_{SC} - EEC_{CC}}{EEC_{SC}} = 3.12 \% \quad (5.1)$$

5.3 Risultati modulo batteria litio polimeri – supercapacità

Le simulazioni numeriche inerenti al nuovo modello di batteria (litio-polimeri) presentano i medesimi andamenti riscontrati precedentemente. Vale la pena di commentare il grafico riassuntivo della potenza elettrica, infatti a differenza delle precedenti simulazioni in questo caso la frenata rigenerativa e quindi la conseguente accensione dei supercondensatori risulta anticipata rispetto alla precedente avendo a disposizione una batteria con una capacità inferiore.

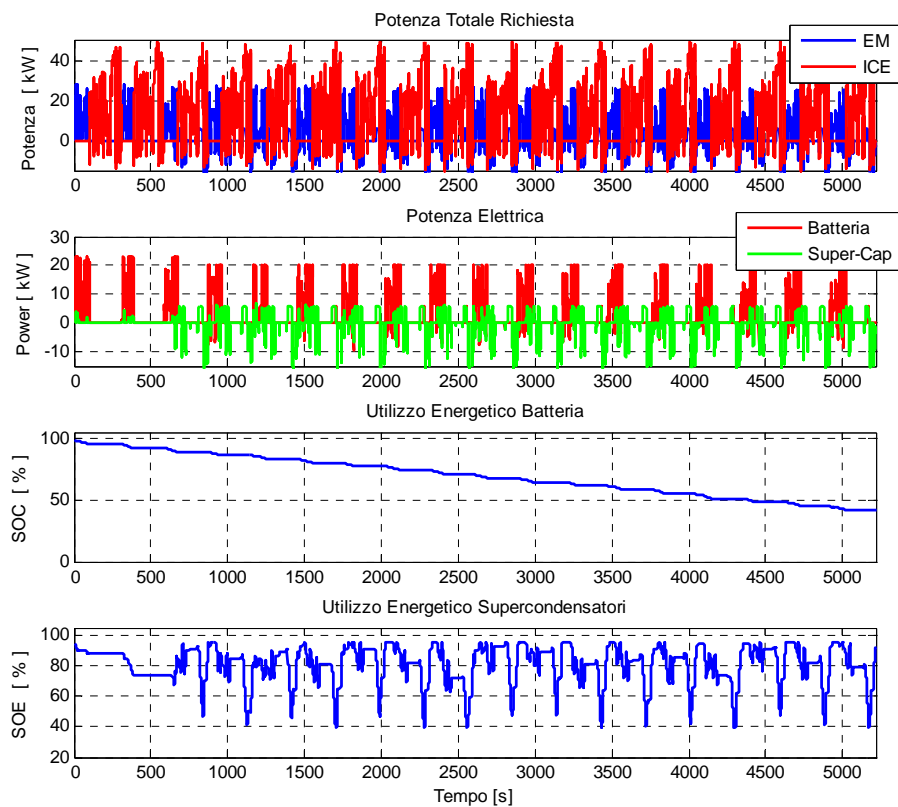


Figura 5.15 – Simulazione con modulo batteria litio-polimeri

		GARA 1 - Giro singolo		GARA 2 - Giro singolo	
		<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>	<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>
Consumo Carb.	[l]	0,3843	0,3599	0,3218	0,3039
Consumo Eq.	[Wh]	3420,4480	3202,6650	2864,1980	2704,9770
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3978	0,3810	0,3351	0,3235
Consumo En. Batteria	[Wh]	173,1045	224,3043	241,6803	259,1761
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	1,4318	0,0000	17,4471
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0201	0,0269	0,0283	0,0331
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,4179	0,4079	0,3634	0,3566
		GARA 3 - Giro singolo		GARA 4 - Giro singolo	
		<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>	<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>
Consumo Carb.	[l]	0,3151	0,2962	0,2934	0,2813
Consumo Eq.	[Wh]	2804,1230	2636,3580	2611,1710	2503,9260
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3281	0,3154	0,3049	0,2992
Consumo En. Batteria	[Wh]	239,4936	258,3680	210,5892	230,7534
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	20,3167	0,0000	0,0000
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0280	0,0333	0,0246	0,0276
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,3561	0,3487	0,3295	0,3268

Tabella 5.7 – Risultati Singolo Giro

		GARA 1 - Gara Completa		GARA 2 - Gara Completa	
		<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>	<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>
Consumo Carb.	[l]	6,9242	6,5238	6,1599	5,8369
Consumo Eq.	[Wh]	61625,3800	58061,8200	54823,1100	51948,4100
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3990	0,3844	0,3556	0,3447
Consumo En. Batteria	[Wh]	3663,9990	4448,2783	4148,3475	4854,7270
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	3,0798	0,0000	3,9126
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0237	0,0295	0,0269	0,0322
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,4227	0,4139	0,3825	0,3769
		GARA 3 - Gara Completa		GARA 4 - Gara Completa	
		<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>	<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>
Consumo Carb.	[l]	6,0395	5,7050	5,5272	5,3243
Consumo Eq.	[Wh]	53751,5500	50774,5000	49192,0800	47386,2700
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3488	0,3368	0,3195	0,3148
Consumo En. Batteria	[Wh]	3898,4199	4763,7015	3812,7168	4250,2055
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	0,9172	0,0000	0,5582
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0253	0,0316	0,0248	0,0282
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,3740	0,3684	0,3442	0,3431

Tabella 5.8 – Risultati Gara Completa

Infine, anche in questo secondo caso, viene valutato il guadagno percentuale ottenuto considerando l'intera gara, composta dalle 4 manche (18 giri ciascuna).

	EEC consumi	EEC batteria	EEC ricarica	EEC totale
	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]
Energia iniziale	-	-	-	0,071992613
GARA 1	0,398965108	0,023720872	0,013526933	0,436212913
GARA 2	0,355620979	0,026909079	0,027953854	0,410483913
GARA 3	0,348754885	0,025294024	0,022876897	0,396925806
GARA 4	0,319468339	0,024760943	0	0,344229282
				1,6598

Tabella 5.9 - Simulazioni senza Supercondensatori

	EEC consumi	EEC batteria	EEC ricarica	EEC totale
	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]
Energia iniziale	-	-	-	0,052158664
GARA 1	0,384384547	0,029469163	0,029121191	0,442974901
GARA 2	0,344654241	0,03223488	0,029121191	0,406010312
GARA 3	0,336756341	0,031600815	0,029121191	0,397478347
GARA 4	0,314836916	0,028242301	0	0,343079218
				1,641701442

Tabella 5.10 – Simulazione con Supercondensatori

Il risparmio complessivo risulta quindi:

$$R = 100 \cdot \frac{EEC_{SC} - EEC_{CC}}{EEC_{SC}} = 1.1 \% \quad (5.2)$$

In questo secondo caso il risparmio risulta essere molto più contenuto rispetto al precedente. La quota parte di risparmio perso risulta essere dovuta al fatto che utilizzando una batteria più leggera, si hanno dei risparmi in termini di consumi di carburante, in quanto si trasporta un peso inferiore, ma d'altro canto il minor quantitativo energetico presente a bordo legato al fatto che la logica di gestione

rimane invariata, costringono ad eseguire delle ricariche più sostanziose tra una gara e la successiva. Considerando inoltre un rendimento di carica pari a 85%, si può cercare di giustificare l'ottenimento di un risparmio così contenuto. Risulta anche corretto affermare che a pari energia richiesta il modulo di batteria ioni-litio contiene un maggior quantitativo di energia. Venendo quindi ricaricato molto di meno, si ottengono delle perdite per caricamento inferiori rispetto all'utilizzo delle batterie litio-polimeri.

5.4 Risultati giro singolo ripetuto

Analizzando i dati raccolti durante le simulazioni precedenti, ci si è resi conto del fatto che i giri di ogni gara risultano molto differenti tra di loro. La logica di controllo implementata su un giro di pista e ripetuta sui 18 giri consecutivamente, non viene quindi ripetuta ciclicamente. In altre parole, se un giro presenta un numero di frenate in elettrico inferiore rispetto al precedente o se le frenate risultano di intensità minore, i supercondensatori, non riuscendo a ricaricarsi, si attiveranno meno volte durante una intera gara e di conseguenza i guadagni risulteranno inferiori. Per questo motivo si è deciso di ricreare una gara completa, ossia comprensiva di 4 manche da 18 giri ciascuna, utilizzando un singolo record temporale riferito ad un singolo giro di pista.

Si sono quindi valutati, anche in questo caso, i guadagni ottenuti utilizzando i supercapacitori in parallelo con il modulo di batteria originale agli ioni di litio e quello successivamente studiato litio-polimeri. I risparmi sulle singole gare, non considerando quindi l'energia iniziale le ricariche, vengono riportati in Tabella 5.11.

		GARA 1 - Completa	GARA 2 - Completa	GARA 3 - Completa	GARA 4 - Completa	Batteria
Risparmio	[%]	3,9002	4,5257	4,5376	4,5593	Originale
Risparmio	[%]	2,0958	2,2541	2,3401	2,4927	Modificata

Tabella 5.11 – Risparmi sulle singole gare

In questo caso, come ci si aspettava, a differenza dei precedenti risultati, la prima gara risulta essere quella con guadagno inferiore in quanto i supercondensatori vengono utilizzati meno volte a seconda del tipo di batteria considerato.

		GARA 1 - Gara Completa		GARA 2 - Gara Completa	
		<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>	<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>
Consumo Carb.	[l]	6,9165	6,6189	6,9082	6,5458
Consumo Eq.	[Wh]	61556,8500	58908,2100	61482,9800	58257,6200
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3991	0,3775	0,3985	0,3731
Consumo En. Batteria	[Wh]	3485,2335	4332,8850	3319,3884	4348,2141
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0226	0,0278	0,0215	0,0279
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,4217	0,4053	0,4200	0,4010
		GARA 3 - Gara Completa		GARA 4 - Gara Completa	
		<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>	<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>
Consumo Carb.	[l]	6,9083	6,5458	6,9084	6,5459
Consumo Eq.	[Wh]	61483,8700	58257,6200	61484,7600	58258,5100
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3985	0,3732	0,3985	0,3732
Consumo En. Batteria	[Wh]	3373,4454	4394,5455	3469,8600	4475,1315
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0219	0,0281	0,0225	0,0287
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,4204	0,4013	0,4210	0,4018

Tabella 5.12 - Gara con giro ripetuto (Batteria ioni di litio)

		GARA 1 - Gara Completa		GARA 2 - Gara Completa	
		<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>	<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>
Consumo Carb.	[l]	6,9165	6,5131	6,9082	6,4685
Consumo Eq.	[Wh]	61556,8500	57966,5900	61482,9800	57569,6500
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3991	0,3844	0,3985	0,3817
Consumo En. Batteria	[Wh]	3485,2335	4294,6732	3319,3884	4357,3383
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0226	0,0285	0,0215	0,0289
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,4217	0,4129	0,4200	0,4105
		GARA 3 - Gara Completa		GARA 4 - Gara Completa	
		<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>	<i>Sim. Senza Supercap</i>	<i>Sim. Con Supercap</i>
Consumo Carb.	[l]	6,9083	6,4685	6,9084	6,4685
Consumo Eq.	[Wh]	61483,8700	57569,6500	61484,7600	57569,6500
EEC - Consumi	[Wh/kgkm]	0,3985	0,3817	0,3985	0,3817
Consumo En. Batteria	[Wh]	3373,4454	4357,3383	3469,8600	4357,3383
Consumo En. Supercap	[Wh]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
EEC - Energia	[Wh/kgkm]	0,0219	0,0289	0,0225	0,0289
EEC - Totale	[Wh/kgkm]	0,4204	0,4105	0,4210	0,4105

Tabella 5.13 – Gara con giro ripetuto (Batteria litio-polimeri)

Infine, anche in questo ultimo caso, viene valutato il guadagno percentuale ottenuto considerando l'intera gara nelle due configurazioni considerate.

	EEC consumi	EEC batteria	EEC ricarica	EEC totale
	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]
Energia iniziale	-	-	-	0,071941015
GARA 1	0,399125145	0,022597718	0,011851038	0,433573901
GARA 2	0,398492819	0,021514124	0,02199782	0,442004762
GARA 3	0,398511772	0,02186521	0,018621158	0,438998139
GARA 4	0,398543158	0,022491573	0	0,421034731
				1,807552549

Tabella 5.14 - Simulazioni senza Supercondensatori

	EEC consumi	EEC batteria	EEC ricarica	EEC totale
	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]
Energia iniziale	-	-	-	0,071691217
GARA 1	0,377507754	0,027766888	0,018845186	0,424119828
GARA 2	0,373147664	0,027850879	0,018845186	0,419843729
GARA 3	0,373153658	0,02814809	0,018845186	0,420146934
GARA 4	0,373173111	0,028665318	0	0,401838429
				1,737640137

Tabella 5.15 - Simulazione con Supercondensatori – Batteria ioni di litio

	EEC consumi	EEC batteria	EEC ricarica	EEC totale
	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]	[Wh/kgkm]
Energia iniziale	-	-	-	0,052121281
GARA 1	0,384404408	0,028480049	0,027281549	0,440166006
GARA 2	0,381653074	0,028886602	0,027281549	0,437821225
GARA 3	0,381653074	0,028886602	0,027281549	0,437821225
GARA 4	0,381653074	0,028886602	0	0,410539676
				1,778469415

Tabella 5.16 - Simulazione con Supercondensatori – Batteria litio-polimeri

Il risparmio complessivo risulta quindi :

$$R_{Batt \text{ Ioni di Litio}} = 100 \cdot \frac{EEC_{SC} - EEC_{CC}}{EEC_{SC}} = 3.87\% \quad (5.3)$$

$$R_{Batt \text{ Litio-Polimeri}} = 100 \cdot \frac{EEC_{SC} - EEC_{CC}}{EEC_{SC}} = 1.61\% \quad (5.4)$$

5.5 Valutazioni sul consumo di combustibile

In questo paragrafo, vengono analizzati i consumi di combustibile fossile calcolati durante le varie simulazioni.

GARA	Sperimentale [l]	Sim riferimento [l]	Sim Scap - Batteria orig [l]	Sim Scap - Batteria modif [l]
1	7,25	6,92	6,63	6,52
2	6,61	6,16	5,90	5,84
3	6,38	6,04	5,77	5,71
4	6,20	5,53	5,38	5,32
TOTALE	26,43	24,65	23,69	23,39

Tabella 5.17 – Consumi di Carburante

Si può notare come sia presente una diminuzione dei consumi tra la gara sperimentale e la simulazione utilizzata come riferimento, dovuta al ritardo di accensione imposto al motore endotermico. Inoltre è presente una ulteriore diminuzione dei consumi nelle simulazioni con ultracapacitori, considerando il modulo batterie originale agli ioni di litio, dovuto esclusivamente all'utilizzo del motore elettrico in aiuto a quello endotermico. Infine risulta presente una ulteriore diminuzione dei consumi di combustibile, se si osserva la simulazione con il modulo di batteria, successivamente studiato al litio-polimeri. In quest'ultimo caso risparmi di carburante risulta imputabile sia all'utilizzo dei supercondensatori che alla diminuzione di peso complessivo della batteria.

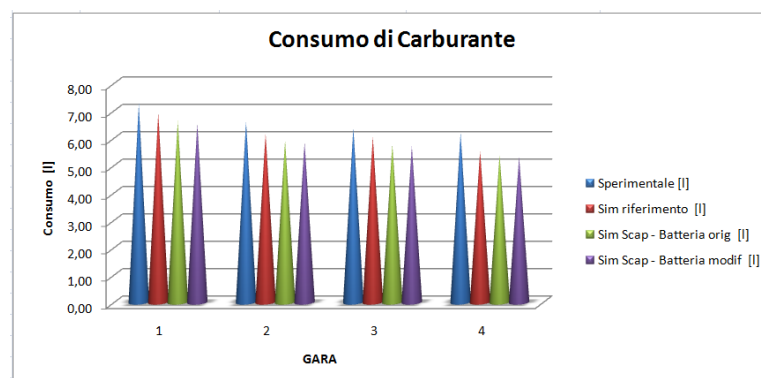


Figura 5.16 – Consumi di Carburante complessivi

Le medesime considerazioni possono essere effettuate osservando i dati relativi alla gara realizzata riproducendo il medesimo giro di pista.

GARA	Sim riferimento [l]	Sim Scap - Batteria orig [l]	Sim Scap - Batteria modif [l]
1	6,92	6,62	6,51
2	6,91	6,55	6,47
3	6,91	6,55	6,47
4	6,91	6,55	6,47
TOTALE	27,64	26,26	25,92

Tabella 5.18 – Consumi di Carburante

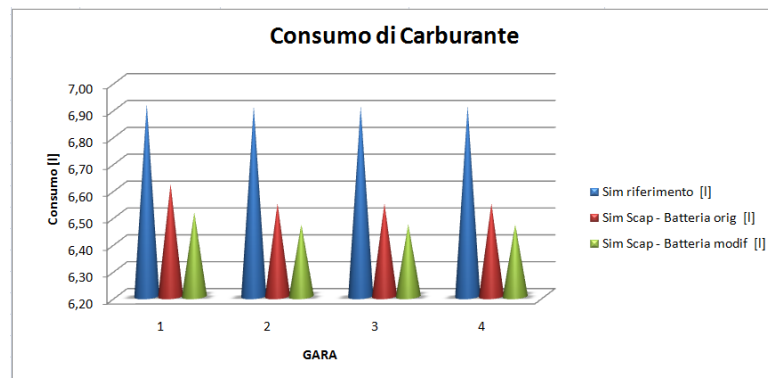


Figura 5.17 – Consumi di Carburante complessivi

In questo caso, come era logico aspettarsi, i risparmi in termini di carburante utilizzato risultano costanti tra le varie gare e notevolmente superiori, rispetto al caso precedente.

Conclusione

L'obiettivo del lavoro di tesi svolto, ha riguardato lo studio di un sistema di accumulo integrato batteria e supercapacità, per un sistema ibrido bimodale. A partire dai dati ricavati per mezzo di un prototipo di veicolo ibrido bimodale, dotato di un sistema di accumulo realizzato mediante batterie agli ioni di litio, si è studiato un innovativo accumulatore di energia basato sull'utilizzo combinato di batterie e supercondensatori. Al fine di poter validare il dispositivo così concepito, si sono utilizzati i dati sperimentali acquisiti durante il 2° Trofeo Aria Nuova, nell'Autodromo di Monza, mediante il prototipo di veicolo ibrido bimodale (FIAT Grande Punto 1.2) dotato di un accumulatore di energia senza supercondensatori. A partire da questi dati e con l'ausilio di un simulatore numerico in grado di riprodurre il reale comportamento di tutti gli organi principali del veicolo ibrido bimodale si sono valutate, passo dopo passo, tutte le modifiche che hanno portato alla creazione del nuovo accumulatore di energia. Lo studio di questo innovativo accumulatore di energia e i recenti sviluppi tecnologici riguardanti i sistemi di accumulo elettrochimici, hanno portato inoltre un notevole ridimensionamento della batteria, rispetto a quella utilizzata sul prototipo ed hanno obbligato a creare una logica di gestione dei due accumulatori (elettrochimici ed elettrostatici) in modo da poterne sfruttare i vantaggi ed allo stesso tempo compensarne i difetti. Per valutare gli effettivi benefici, ottenuti mediante il nuovo accumulatore energetico, si è tenuto conto di un indice globale di consumo energetico in grado di riassumere in un unico numero la quota parte di energia utilizzata dal motore endotermico, convertendo il consumo di combustibile, e la quota parte di energia richiesta dall'azionamento elettrico.

L'obiettivo principe di questo lavoro di tesi, volto a studiare un sistema di accumulo dell'energia composto da due differenti tipologie di accumulatori risulta

quindi essere stato pienamente raggiunto. Si è infatti riusciti a creare un accumulatore energetico per veicoli ibridi in grado di garantire, con un peso ed un volume contenuti, una elevata capacità di immagazzinamento dell'energia e contemporaneamente una rilevante potenza di picco. Il primo obiettivo è stato ottenuto, creando una logica di gestione dell'energia in grado di utilizzare i pregi degli accumulatori di tipo elettrochimico e quelli di tipo elettrostatico (supercondensatori), cercando di compensare i punti deboli di entrambe le tecnologie.

Il secondo obiettivo imposto consisteva nella gestione dell'energia contenuta nei supercondensatori in modo da alimentare il motore elettrico al fine di diminuire l'utilizzo di quello endotermico, con lo scopo di consumare un quantitativo di carburante inferiore rispetto al caso in cui si utilizzi solamente il motore a combustione interna. Anche il secondo obiettivo risulta essere stato raggiunto, riuscendo a diminuire notevolmente i consumi di combustibile utilizzato per disputare le gare sul circuito di Monza. In questo caso, si è inoltre cercato di sviluppare una logica di gestione che prevedeva la ripartizione della coppia tra i due motori in modo da far lavorare il motore endotermico nelle zone di massimo rendimento ed utilizzare l'energia contenuta nei supercondensatori per alimentare il motore elettrico al fine di fornire al veicolo la rimanente coppia richiesta. Le mappe invertite, mediante l'ausilio del linguaggio di programmazione Matlab[®], non risultavano così definite, soprattutto a basso grado di ammissione, da fornire un valore del segnale pedale sufficientemente approssimato per effettuare la ripartizione tra motore elettrico ed endotermico. Si è quindi passati ad implementare una logica di ripartizione più semplice ma comunque in grado di garantire dei consumi di combustibile inferiore.

Si è anche tenuto in considerazione la possibilità di utilizzare la frenata rigenerativa in modo da ricaricare gli ultracapacitori. Come ci si aspettava, nonostante il fatto che gli accumulatori di tipo elettrostatico siano in grado di immagazzinare un quantitativo di energia nettamente inferiore rispetto alle batterie per veicoli

elettrici, risultano essere utilizzabili ciclicamente grazie alla maggior densità di potenza disponibile.

Alla luce delle considerazioni appena esposte e dei risultati ottenuti, si ritiene che l'ausilio di un modulo di supercondensatori all'interno di un veicolo elettrico puro e/o bimodale risulti utile al fine di cercare di eliminare quelli che sono i principali limiti di un accumulatore di energia per veicoli ibridi bimodali. Infatti utilizzando un modulo di supercondensatori in parallelo con una batteria per veicoli ibridi si eliminano il limiti di potenza imposti appunto dalla batteria stessa. In questo modo, si crede che sia possibile ridurre notevolmente i pesi e gli ingombri in quanto distribuendo l'energia contenuta nei supercondensatori per far fronte alle richieste di picchi di potenza da parte dell'azionamento elettrico, permette di dimensionare la batteria per potenze inferiori. Inoltre, grazie al fatto che i supercondensatori possono ricaricarsi e quindi essere utilizzati continuamente, diminuisce l'utilizzo complessivo della batteria che risulta essere superiore anche nel caso in cui si convogli tutta l'energia di ricarica in essa. Contemporaneamente, nei veicoli bimodali, l'utilizzo di una logica di gestione che distribuisca la richiesta di potenza tra i due motori a disposizione (elettrico ed endotermico), risulta essere in grado di diminuire i consumi prodotti e conseguentemente abbattere le emissioni di sostanze inquinanti nell'ambiente.

A partire da questo lavoro di tesi si possono sviluppare in futuro diversi temi: risulta infatti necessario migliorare il modello inerente ai supercondensatori, inserendo anche il modello reale di un convertitore DC/DC che nel caso in esame è stato supposto ideale ed a rendimento costante. Successivamente si potrebbero eseguire degli studi mirati al miglioramento della logica di gestione dei supercondensatori, utilizzabili come fonte energetica, in parallelo con le batteria al litio nei veicoli bimodali, in ambito urbano. Infatti in città si possono ritrovare le migliori condizioni in cui poter sfruttare al massimo le proprietà dei supercondensatori. Infine, si potrebbe realizzare un prototipo di accumulatore energetico

innovativo, formato dal modulo di batteria al litio e da quello di supercondensatori, opportunamente dimensionato, in grado di essere inserito all'interno del veicolo bimodale. In questo modo si possono avviare diverse campagne di sperimentazione volte al miglioramento sia dell'accumulatore energetico innovativo che della logica di gestione dei moduli di accumulo di energia.

Appendice A

Listato Matlab[®] funzione mat_logica_controllo.m

```

function usc = mat_logica_controllo(ing)
global giro_selez comand_model
time=ing(1);
Tmin_em=ing(2); % Coppia Min - EM - [Nm]
Tmax_em=ing(3); % Coppia Max - EM - [Nm]
Tmax_ice=ing(4); % Coppia Max - ICE - [Nm]
Tric = ing(5); % Coppia Max negativa in ricarica (I=-60A)-[Nm]
ped = ing(6); % Pedale acceleratore [%]
mod=ing(7); % Modalità
clutch=ing(8); % Comando CLUTCH
ice_on=ing(9); % Comando Accensione motore endo
ice_on_prec=ing(10); % Comando Acc motore endo ritardato
conta_distanza=ing(11); % Distanza percorsa - [m]
numero_giri=ing(12); % Numero giri percorsi
Pot_azz = ing(13); % Potenza richiesta dall'azz - [W]
SOC = ing(14); % SOC
SOE = ing(15); % SOE
Ibatt = ing(16); % Corrente di Batteria - [A]
Coppia = ing(17); % Coppia Ucap a Potenza fissa - [Nm]

tau_belt=1.77; % Rapporto di trasmissione
tau_diff=4.071; % Rapporto differenziale
belt_eff=sqrt(0.9); % Efficienza di trasmissione
diff_eff=sqrt(0.9); % Efficienza differenziale
com_off=0; % Comando di accensione motore asincrono

if giro_selez == 2
    giro_limite = 4 ;
else
    giro_limite = 0 ;
end

%% Limiti di utilizzo BATTERIA
if SOC<=0.9
    SOCruc_fren=0.95;
elseif SOC>0.95
    SOCruc_fren=0.90;
else
    SOCruc_fren=0.85;
end

%% Limiti di utilizzo SUPERCAP
SOE_max=0.95;
SOE_min = 0.4;

```

```

if SOE<0.95
    Tric=-10000;
end

%% Limiti di Potenza BATTERIA - SUPERCAP
if conta_distanza> 0 && conta_distanza<dstop
    Pot_limite = 20*10^3;
else
    Pot_limite = 0;
end
elseif numero_giri==giro_limite
    if conta_distanza> 0 && conta_distanza<dstop
        Pot_limite = 23*10^3;
    else
        Pot_limite = 0;
    end
elseif numero_giri<giro_limite
    Pot_limite=23*10^3 ;
end

d1=1400;
d2=1500;
d3=1900;
d4=2100;
d5=4200;
d6=4900;

if numero_giri>=giro_limite
    if (conta_distanza>d1 && conta_distanza<d2) ||
        (conta_distanza>d3 && conta_distanza<d4) ||
        (conta_distanza>d5 && conta_distanza<d6)
        attiva_cap = 1;
    else
        attiva_cap = 0 ;
    end
else
    attiva_cap = 0 ;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% MODALITA' : PURO ELETTRICO
if mod==1
    if ped>=0                % FASE di accelerazione
        Tem=1.2*ped;
        if Tem>Tmax_em
            Tem=Tmax_em;
        end
        Tice=0;
        Tbrake=0;
    else                    % FASE di frenata

```

```

    if SOC<SOCric_fren
        if ped>Tmin_em*tau_belt*tau_diff/belt_eff/diff_eff
            Tem=ped/tau_belt*belt_eff/tau_diff*diff_eff;
            Tbrake=0;
        else
            Tem=Tmin_em;
            Tbrake=ped-
Tmin_em*tau_belt*tau_diff/diff_eff/belt_eff;
        end
    else
        Tem=0;
        Tbrake=ped;
    end
    Tice=0;
end
clutch=1;
Tstart=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% MODALITA' : PURO ENDOTERMICO
elseif mod==2
    if ped>=0          % FASE di accelerazione
        Tice=1.02*ped;
        if Tice>Tmax_ice
            Tice=Tmax_ice;
        end
        Tem=0;
        Tbrake=0;
    else                % FASE di frenata
        Tice=0;
        Tem=0;
        Tbrake=ped;
    end
    clutch=ing(8);
    Tstart=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% MODALITA' : START - STOP
elseif mod==3
    if ice_on==1
        if ped<0
            if SOC<SOCric_fren
                if
ped>=Tmin_em*tau_belt*tau_diff/belt_eff/diff_eff
                    if
ped>Tric*tau_belt*tau_diff/belt_eff/diff_eff
                        Tem=ped/tau_belt/tau_diff*belt_eff*diff_eff;
                        Tbrake=0;
                    else
                        Tem=Tric;
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

                                Tbrake=ped-
Tem*tau_belt*tau_diff/belt_eff/diff_eff;
                                end
                                else
                                if Tmin_em > Tric
                                    Tem=Tmin_em;
                                    Tbrake=ped-
Tem*tau_belt*tau_diff/belt_eff/diff_eff;
                                else
                                    Tem=Tric;
                                    Tbrake=ped-
Tem*tau_belt*tau_diff/belt_eff/diff_eff;
                                end
                                end
                                else
                                    Tbrake=ped;
                                    Tem=0;
                                end
                                Tice=0;
elseif ped==0
    Tem=0;
    Tbrake=0;
    Tice=0;
else
    if SOE>SOE_min
        if attiva_cap == 1

            Tem = Coppia;
            if Tem>Tmax_em
                Tem = Tmax_em;
            end

            Tice = 1.02*(ped-Tem/1.2);

            if Tice>Tmax_ice
                Tice=Tmax_ice;
            end

            if Tice < 0
                Tice=0;
            end

            com_off = 1 ;
            Tbrake=0;
        else
            Tem=0;
            Tbrake=0;
            Tice=1.02*ped;

            if Tice>Tmax_ice
                Tice=Tmax_ice;
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
else
    Tem=0;
    Tbrake=0;
    Tice=1.02*ped;

    if Tice>Tmax_ice
        Tice=Tmax_ice;
    end
end
end
clutch=ing(8);
else % Modalità in puro elettrico ==> Ice off
    if ped<0
        if SOC<SOCric_fren
            if
ped>=Tmin_em*tau_belt*tau_diff/belt_eff/diff_eff
if ped>Tric*tau_belt*tau_diff/belt_eff/diff_eff
Tem=ped/tau_belt/tau_diff*belt_eff*diff_eff;
                Tbrake=0;
            else
                Tem=Tric;
                Tbrake=ped-
Tem*tau_belt*tau_diff/belt_eff/diff_eff;
            end
            else
                if Tmin_em > Tric
                    Tem=Tmin_em;
                    Tbrake=ped-
Tem*tau_belt*tau_diff/belt_eff/diff_eff;
                else
                    Tem=Tric;
                    Tbrake=ped-
Tem*tau_belt*tau_diff/belt_eff/diff_eff;
                end
            end
        end
    else
        Tbrake=ped;
        Tem=0;
    end
    Tice=0;
elseif ped==0
    Tem=0;
    Tbrake=0;
    Tice=0;
else
    Tem=1.2*ped;
    if Tem>Tmax_em
        Tem=Tmax_em;
    end
    Tice=0;
end

```

```

        Tbrake=0;
    end
    clutch=1;
end

if ice_on==1 && ice_on_prec==0
    Tstart=time;
else
    Tstart=0;
end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% LOGICA di distribuzione della Potenza %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if conta_distanza<0
    Pot_bat=Pot_azz;
    Pot_cap=0;
else
    if Pot_azz<0
        if SOE<SOE_max
            Pot_cap=Pot_azz;
            Pot_bat=0;
        else
            Pot_bat=Pot_azz;
            Pot_cap=0;
        end
    elseif Pot_azz>0
        if Pot_azz<Pot_limite
            Pot_cap=0;
            Pot_bat=Pot_azz;
        else
            if SOE>SOE_min
                Pot_cap=Pot_azz-Pot_limite;
                Pot_bat=Pot_limite;
            else
                Pot_cap=0;
                Pot_bat=Pot_azz;
            end
        end
    end
    else
        Pot_bat=0;
        Pot_cap=0;
    end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if time>=Tstart && time<=Tstart+0.5 && Tstart~=0
    ice_start=1;
    clutch=0;
    if ped>0
        Tem=0;
    end
end

```



```
                if Tem>Tmax_em
                    Tem=0;
                end
            end
        else
            ice_start=0;
            usc(5)=clutch;
        end

        if mod==1
            ice_on=0;
        elseif mod==2;
            ice_on=1;
        end

        usc(1)=Tice;
        usc(2)=Tem;
        usc(3)=Tbrake;
        usc(4)=ice_on;
        usc(5)=clutch;
        usc(6)=ice_start;
        usc(7)=Pot_bat;
        usc(8)=Pot_cap;
        usc(9)=com_off;

        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Bibliografia

- [1] Allen E. Fuhs. *Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation*, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [2] C. C. Chan. *The state of the art of electric and hybrid vehicles*, Proc. IEEE, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, Feb. 2002.
- [3] C. C. Chan and K. T. Chau. *Modern electric vehicle technology*, Oxford Science Publications.
- [4] Seth Leitman, *Build your own Plug-IN hybrid electric vehicle*.
- [5] Giancarlo Genta, Lorenzo Morello. *The automotive Chassis*, Volume 2 – System Design, Sprinder.
- [6] Yozo Hasegawa. *L'auto Pulita La sfida tra Honda Toyota e le big mondiali dell'auto*, Francesco Brioschi Editore, marzo 2009.
- [7] Andrew F. Burke, *Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*.
- [8] John M. Miller PE, *Energy Storage Technology Markets and Application's: Ultracapacitors in Combination with Lithium-ion*, PhD Maxwell Technologies. The 7th International Conference on Power Electronics, October 22-26, 2007.
- [9] A. F. Burke and M. Miller, *Comparisons of ultracapacitors and advanced batteries for pulse power in vehicle applications: Performance, life, and cost*.
- [10] F. M. Delnick, D. Ingersoll, X. Andrieu, K. Naoi, *The Electrochemical Capacitors II*.
- [11] Zaki Ahimad, *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*, IChem^E, pp. 64-66.
- [12] Xiaoge Gregory Zhang, *Electrochemistry of Silicon and its Oxide*, pag. 1-42.
- [13] D. Scherson, J. Harb, M. Tao, *Fundamentals of Energy Storage and Conversion*, ECS Transactions.
- [14] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Ali Emadi, *Modern Electric Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles*, CRC Press.
- [15] Schneuwly, R. Gallay, *Properties and applications of supercapacitors. From the state of the art to future trends*, Proceeding PCIM 2000, International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality, Nürnberg, Germany, 6-8 June 2008.

-
- [16] A. Stepanov, I. Galkin, L. Bisenieks, *Implementation of supercapacitors in uninterruptible power supplies*, in EPE 2007, 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2007.
- [17] C. R. Akli, X. Roboam, B. Sareni, A. Jeunesse, *Energy management and sizing of a hybrid locomotive*, in EPE 2007, 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2007.
- [18] A. Rufer, *Power-electronic interface for a supercapacitor-based energy storage substation in DC-transportation networks*, in EPE 2003, 10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, France, 2-4 September 2003.
- [19] D. Iannuzzi, P. Tricoli, *Integrated storage devices for ropeway plants: useful tools for peak shaving*, in IECON 2007, 33rd annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, Taiwan, 5-8 November 2007.
- [20] M. Becherif, M. Y. Ayad, A. Djerdir, A. Miraou, *Electrical train feeding by association of supercapacitors, photovoltaic and wind generators*, in ICCEP 2007, International Conference on Clean Electrical Power, Capri (Italy), 21-23 May 2007.
- [21] Jinrui N', Zhifu W', Qinglian R², *Simulation and Analysis of Performance of a Pure Electric Vehicle with a Super-capacitor*.
- [22] L. Sun, W. Chen, R. Wang, X. Yuan and F. Sun, *Applications of the Super-Capacitor System in Electric Vehicles*, 2003 Annual Conference of Society of Automotive Engineering - China. August 2003.
- [23] Mehrdad Ehsani, Fellow IEEE, Yimin Gao, and John M. Miller, Fellow *Hybrid Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives*, IEEE.
- [24] K. Wang, F.C. Lee and Lai, *Operation principles of bi-directional full-bridge DC/DC converter with unified soft-switching scheme and soft starting capability*. Proc. of IEEE APEC 2000, Vol. 1 pp 111-118.
- [25] W. Lhommel, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol, A. Rufer, *Design and Control of a Supercapacitor Storage System for Traction Applications*.
- [26] A. Rufer, P. Barrade, *A Supercapacitor-Based Energy Storage System for Elevators with Soft Commutated Interface*, *IEEE-IAS'2001*, Chicago, October 2001, vol. 2, pp. 1413 -1418.
- [27] Hosein Farzaneh-fard, Dawood Shekari Beyragh, Ehsan Adib, *A Fully Soft Switched Converter for Ultracapacitors Interface Circuit*, Isfahan University of Technology.
- [28] Yimin Gao, Mehrdad Ehsani, *Parametric Design of the Traction Motor and Energy Storage for Series Hybrid Off-Road and Military Vehicles*, IEEE.

- [29] K. Stricklett, *Advanced components for electric and hybrid electric vehicles*, NIST Special Publication 860 National Institute of Standard and Technology.
- [30] Arvind Govindaraj, Srdjan M. Lukic, Ali Emadi, *A Novel Scheme for Optimal Paralleling of Batteries and Ultracapacitors*.
- [31] <http://ec.europa.eu/dgs/jrc/index.cfm>
- [32] Regolamento di Gara (Trofeo Aria Nuova)
- [33] M. Shimid, A.Egeer, *Double-Layer Capacitor Short-Time Storage Device in a Hybrid Vehicle*, Record of EPE 1999, Lausanne, Switzerland.
- [34] Holly Moore, *Matlab per l'ingegneria*, Pearson Prentice Hall.
- [35] Mario Bertolino, *Modello di simulazione per un veicolo ibrido elettrico bimodale*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica.
- [36] Michele Contrino, *Strategie di controllo di un veicolo ibrido plug-in*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica.
- [37] Giorgio Diana, Ferruccio Resta, *Controllo di Sistemi Meccanici*, PoliPress.
- [38] GianAntonio Magnani, Gianni Ferretti, Paolo Rocco, *Tecnologie di sistemi di controllo*, McGraw-Hill.
- [39] Renato Manigrasso, Ferdinando L. Mapelli, Marco Mauri, *Azionamenti Elettrici, generalità e macchine rotanti*.edizioni Pitagora, 2007
- [40] Liqing Sun, Ruchuan Liang, Qingcai Wang, *The Control Strategy and System Preferences of Plug-in HEV*, Institute of Technology, Beijing, China.
- [41] T. Azib, O. Bethoux, G. Remy, C. Marchand, *Structure and Control Strategy for a Parallel Hybrid Fuel Cell/Supercapacitors Power Source*, IEEE.
- [42] Jorge Moreno, Micah E. Ortúzar, Juan W. Dixon, *Energy-Management System for a Hybrid Electric Vehicle, Using Ultracapacitors and Neural Networks*, IEEE
- [43] Ing. Emil KALINA, Doctoral Degree, *APPLICATIONS OF ULTRACAPACITORS IN ELECTRIC AND HYBRID ELECTRIC VEHICLES*, Dept. of Electrical Power Engineering, FEEC, BUT