

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria dei Processi Industriali
Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrica

Dipartimento di Elettrotecnica



STUDIO DI FATTIBILITÀ DI UN SISTEMA A SUPERCONDENSATORI PER VEICOLI IBRIDI SERIE

Relatore: Chiar.mo Prof. Ing. Enrico TIRONI

Tesi di Laurea Specialistica di:

Gianni MAZZOLENI Matr: 721440

Anno accademico 2008/2009

To know that we know what we know, and know that we do not know what we do not know,
that is the true knowledge.

Niccolò Copernico

Indice

1. Introduzione	pag. 1
1.1. Emissioni inquinanti	pag. 1
1.2. Riscaldamento globale e gas serra	pag. 3
1.3. Risorse petrolifere	pag. 4
1.4. Costi indotti	pag. 5
1.5. Conclusione	pag. 5
Bibliografia	pag. 6
2. Evoluzione storica dei veicoli ibridi elettrici	pag. 7
Bibliografia	pag. 11
3. L'efficienza dei veicoli ibridi	pag.12
3.1. Tecnologie per l'incremento dell'efficienza esclusive dei veicoli ibridi	pag. 12
3.2. Tecnologie minori	pag. 14
3.3. Tecnologie per l'incremento dell'efficienza comuni ai veicoli ibridi e convenzionali	pag. 16
Bibliografia	pag. 17
4. Topologia dei veicoli ibridi	pag. 18
4.1. Concetto di trazione ibrida elettrica	pag. 20
4.2. Architettura dei veicoli ibridi	pag. 23
4.2.1. Sistema di trazione ibrido serie	pag. 24

4.2.2. Sistema di trazione ibrido parallelo	pag. 26
4.2.3. Sistema di trazione ibrido serie-parallelo	pag. 30
4.2.4. Sistema di trazione ibrido complesso	pag. 31
4.3. Classificazione dei veicoli ibridi in funzione del grado di ibridazione	pag. 32
Bibliografia	pag. 34

5. Sistemi di accumulo in ambito auto motive pag. 35

5.1. Accumulatori elettrochimici	pag. 35
5.1.1. Tecnologie utilizzate nelle batterie	pag. 36
5.2. Supercondensatori	pag. 38
5.3. Volani ad altissima velocità	pag. 40
5.4. Raffronto tra le diverse forme di accumulo	pag. 41
Bibliografia	pag. 46

6. Modellizzazione di un veicolo ibrido serie pag. 47

6.1. Dinamica longitudinale del veicolo	pag. 48
6.1.1. Forza d'attrito aerodinamico	pag. 49
6.1.2. Forza d'attrito volvente	pag. 51
6.1.3. Forza legata alla gravità in strade non orizzontali	pag. 52
6.1.4. Forza d'inerzia	pag. 53
6.2. Motore a combustione interna	pag. 55
6.2.1. Variabili normalizzate	pag. 56
6.2.2. Consumo specifico e efficienza	pag. 57
6.3. Trasmissione e cambio	pag. 59
6.3.1. Efficienza del cambio	pag. 60
6.4. Motore asincrono trifase	pag. 61
6.5. Supercondensatore	pag. 63
Bibliografia	pag. 67

7. Simulazione di un veicolo a benzina	pag. 68
Bibliografia	pag. 77
8. Simulazione del veicolo ibrido elettrico serie	pag. 78
8.1. Dimensionamento del sistema di accumulo	pag. 80
8.1.1. Dimensionamento del sistema di accumulo in funzione dell'energia recuperabile in frenatura	pag. 81
8.1.2. Verifica del sistema di accumulo	pag. 83
8.1.3. Utilizzo del sistema di Start-Stop	pag. 88
8.2. Dimensionamento del sistema di accumulo in funzione dell'ottimizzazione del motore termico	pag. 92
9. Conclusione	pag. 101
Appendice	pag. 102
Ringraziamenti	pag. 108

1 Introduzione

L'invenzione del motore a combustione interna e più in generale dell'automobile rappresenta uno dei più grandi successi della tecnologia moderna. L'automobile ha dato un grande contributo allo sviluppo della società moderna soddisfacendo alla necessità di mobilità e allo stesso tempo ha consentito all'industria automobilistica di diventare la colonna portante dell'economia mondiale.

Tuttavia è necessario considerare gli aspetti negativi di questo inarrestabile successo, il sempre più crescente utilizzo di automobili nel mondo ha causato e continua a causare seri problemi per l'ambiente e la società.

Inquinamento dell'aria, il riscaldamento globale, le metropoli congestionate e l'esaurimento delle risorse petrolifere non sono che i principali problemi.

~ 1.1 Emissioni inquinanti

Oggi giorno tutti i veicoli fanno affidamento sulla combustione degli idrocarburi per ricavare l'energia necessaria alla loro propulsione. Idealmente, la combustione di un idrocarburo porta alla formazione di sola anidride carbonica e acqua, non responsabili dell'inquinamento dell'aria.

In realtà la combustione degli idrocarburi non avviene mai idealmente, producendo dei residui di combustione inquinanti [1], tra i quali:

- Ossidi di azoto (NO_x), alcuni di quali in presenza di radiazione solare possono reagire con l'ossigeno formando ozono e altri composti pericolosi per le membrane cellulari. Il triossido ed il pentossido di diazoto sono solubili in acqua e con l'umidità atmosferica possono formare acido nitroso e acido nitrico, entrambi presenti nelle cosiddette "piogge acide".
- Monossido di carbonio, prodotto dalla combustione incompleta degli idrocarburi a causa della mancanza di ossigeno. E' velenoso per animali e uomini che lo respirano, perché si fissa all'emoglobina al posto dell'ossigeno causando asfissia.
- Idrocarburi incombusti, in funzione della loro natura gli idrocarburi incombusti possono essere dannosi. Ad esempio alcuni di essi, come il benzene, sono velenosi e cancerogeni, altri sono responsabili dello smog e della presenza dell'ozono nella bassa atmosfera.
- Particolato, è l'inquinante che oggi è considerato di maggiore impatto nelle aree urbane, ed è composto da tutte quelle particelle solide e liquide disperse nell'atmosfera, con un diametro che va da pochi nanometri fino ai 500 micron e oltre. Il particolato ha effetti diversi sulla salute umana ed

animale a seconda dell'origine (naturale, antropica ecc.) e delle dimensioni delle polveri. Tra i disturbi attribuiti al particolato fine e ultrafine (PM_{10} e soprattutto $PM_{2,5}$) vi sono patologie acute e croniche a carico dell'apparato respiratorio (asma, bronchiti, enfisema, tumori) e cardio-circolatorio. L'emissione di particolato, nel campo automobilistico riguarda in maniera particolare i motori diesel di ultima generazione.

- Altri inquinanti, tra i più importanti troviamo i solfuri. In contatto con l'aria, i solfuri danno luogo ad una reazione che porta alla creazione di acido solforico, il componente principale delle piogge acide

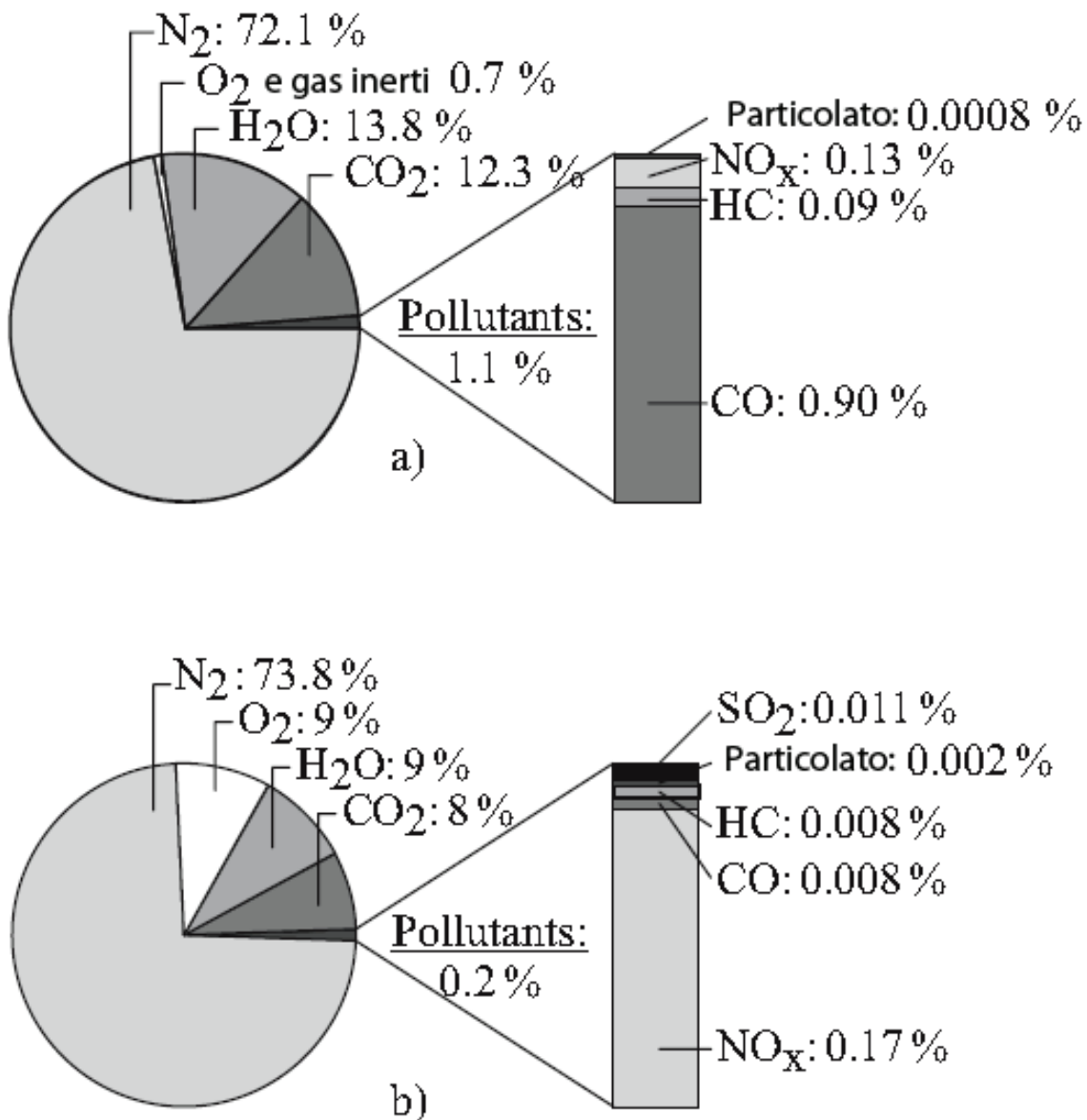


Figura 1.1 Emissioni (in assenza di catalisi) in percentuale di volume di a) motore a benzina b) motore diesel [2]

~ 1.2 Riscaldamento globale e gas serra

Il riscaldamento globale è il diretto risultato dell'effetto serra causato dalla presenza di anidride carbonica e altri gas, come il metano, nell'atmosfera. Questi gas intrappolano la radiazione solare infrarossa riflessa dal terreno, immagazzinando energia nell'atmosfera con diretta conseguenza l'incremento di temperatura.

Un incremento della temperatura ha come risultato gli sconvolgimenti climatici e ambientali che colpiscono varie parti del pianeta.

Il principale responsabile, l'anidride carbonica, è il risultato della combustione presente in quasi tutte le principali attività umane. Il trasporto è responsabile della produzione di almeno un terzo delle emissioni di anidride carbonica come si può ben vedere dal grafico successivo.

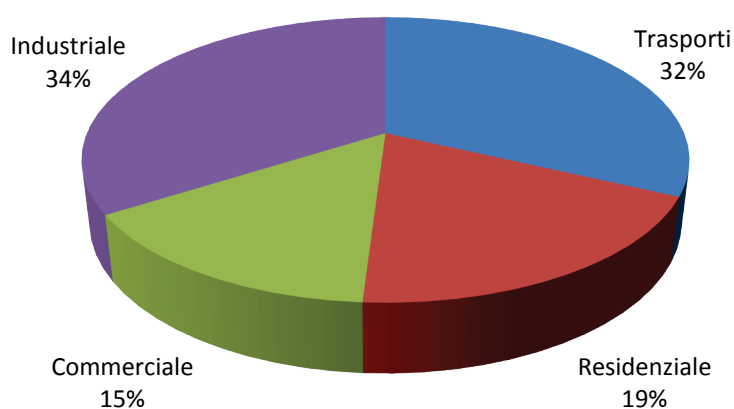


Figura 1.2 Distribuzione delle emissioni di anidride carbonica 1980-1999

Focalizzandosi in maniera particolare sui trasporti, come si può notare dalla figura 3, la principale fonte di emissione di gas serra è dovuta al trasporto su gomma. Emerge prepotentemente la necessità di porre un limite alle emissioni di gas serra, in questo contesto infatti si inseriscono gli standard europei sulle emissioni inquinanti. Questi standard rappresentano una serie di limitazioni imposte sulle emissioni dei veicoli venduti degli Stati membri dell'Unione Europea, identificati con la sigla Euro- seguita da un numero [3].

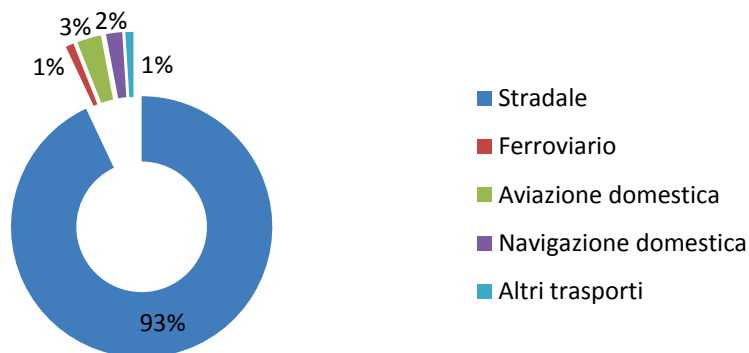


Figura 1.3 Emissione gas a effetto serra, per tipo di trasporto in EU-25 nel 2004 (Agenzia Europea per l'ambiente, 2007)

~ 1.3 Risorse petrolifere

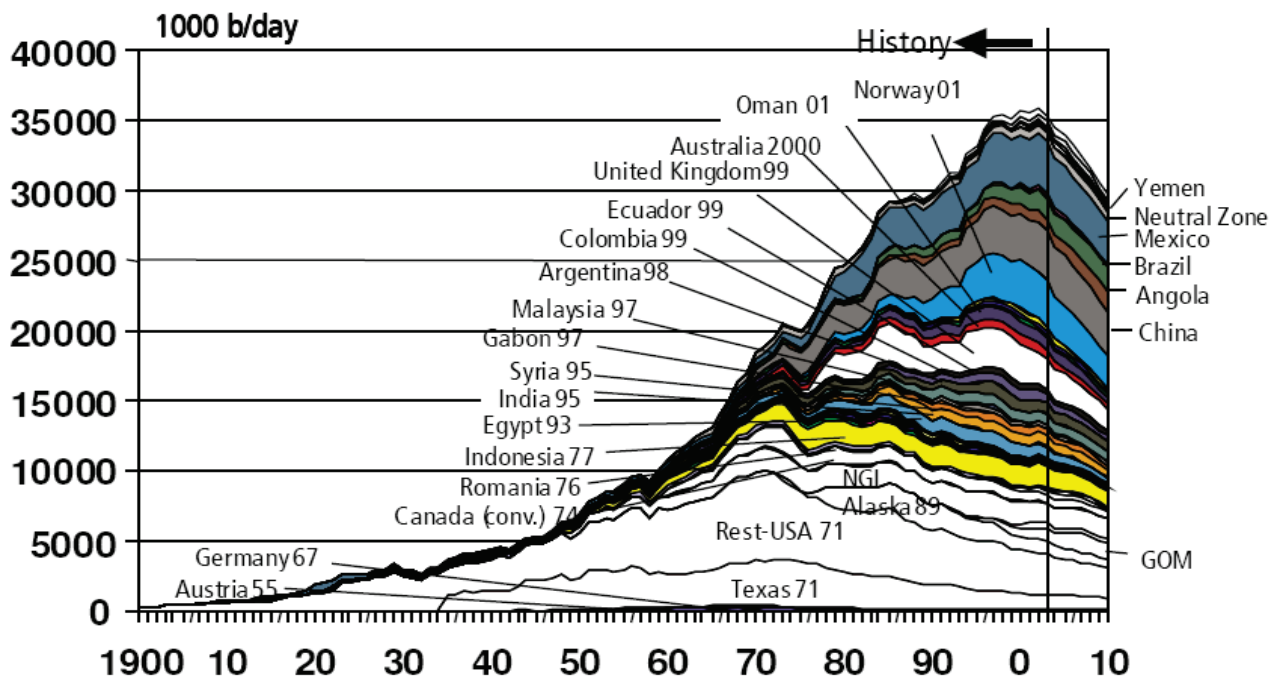
La maggioranza dei combustibili fossili utilizzati per i trasporti sono ricavati dal petrolio, un combustibile fossile, risultato dalla decomposizione di materia organica rimasta imprigionata per milioni di anni nel sottosuolo.

Il petrolio estratto oggi rappresenta la porzione facilmente estraibile, che giace vicino alla superficie, in regioni dove il clima non pone grandi ostacoli. A queste riserve ne vanno poi aggiunte una serie di altre di difficile estrazione o di scarsa qualità.

Per riserve di petrolio si intende la quantità di idrocarburi liquidi che si stima potranno essere estratti in futuro dai giacimenti già scoperti. Generalmente i volumi che potranno essere estratti da giacimenti non ancora sfruttati sono denominati riserve.

La determinazione delle riserve è condizionata dalle incertezze tecniche ed economiche. Le incertezze tecniche derivano dal fatto che i volumi di idrocarburo contenuti nel giacimento sono stimati quasi esclusivamente attraverso dati ottenuti con metodi indiretti (tra i più diffusi la prospezione sismica e le misure di proprietà fisiche delle rocce nei pozzi). Le informazioni dirette sono necessariamente poche in quanto provengono dalla perforazione dei pozzi, cosa assai costosa.

Il conseguente ridursi delle riserve facilmente estraibili fa presupporre, per il futuro, un'epoca in cui il petrolio diverrà sempre meno disponibile ed economico.



Source: Industry database, 2003 (IHS 2003)
OGJ, 9 Feb 2004 (Jan-Nov 2003)

Figura 1.4 Previsioni della produzione di petrolio esclusi i paesi OPEC e l'Unione Sovietica fatta dal Governo Americano 2004 [4]

Le conseguenze dirette e indirette si ripercuoteranno in tutti i settori, dalla produzione di energia elettrica ai trasporti, con la necessità di utilizzare il petrolio nella maniera più efficiente.

~ 1.4 Costi indotti

I problemi associati con il consumo dei combustibili fossili come visto in precedenza sono molti.

Altrettanto difficile è stimare i costi associati a questi problemi sia essi diretti o indiretti, finanziari, sociali o ambedue.

I costi indotti dall'inquinamento, non sono limitati alle spese sanitarie, ma comprendono anche le devastazioni causate dalle piogge acide al patrimonio boschivo e il costo del restauro e del mantenimento dei monumenti.

I costi associati al riscaldamento globale sono di difficile analisi, possono includere il costo legato ai danni causati da uragani, siccità, carestie e inondazioni. Il loro ammontare può essere potenzialmente immenso.

Per quanto riguarda le riserve petrolifere e il loro esaurimento questo comporta conseguenze su scala geopolitica, con costi economici e sociali legati all'instabilità politica delle aree a più alta concentrazione delle riserve e eventuali conflitti bellici

~ 1.5 Conclusione

Il numero di anni di fornitura del petrolio, che le riserve petrolifere garantiscono, dipende dalla scoperta di nuove riserve di petrolio.

Alla ricerca di possibili soluzioni a tali problemi, in tempi recenti si è sviluppato un interesse crescente per i veicoli elettrici e ibridi elettrici. La ricerca e lo sviluppo in ambito automobilistico si sono quindi orientati verso lo studio di veicoli puliti, sicuri e ad alta efficienza.

Questo nuovo corso è essenzialmente legato alla formazione di una nuova coscienza ambientale, la cosiddetta "green revolution", e all'instabilità dei mercati petroliferi.

Prima di addentrarsi nell'argomento è necessario dare una definizione di veicolo ibrido. Per ibrido s'intende un veicolo che combina due metodi di propulsione differenti. Solitamente una sorgente è adibita all'immagazzinamento di energia mentre l'altra alla conversione del carburante in energia. Per esempio alcune combinazioni delle tante possono essere: motore a combustione/volano, motore a combustione/batterie, celle a combustibile/batterie.

Bibliografia

- [1] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi, “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles”, CRC Press 2005, ISBN 0849331544.
- [2] Günter P. Merker, Christian Schwarz, Gunnar Stiesch, Frank Otto, “Simulating combustion”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006, ISBN 9783540251613.
- [3] Agenzia europea per l’ambiente, www.eea.europa.eu.
- [4] Office of Deputy Assistant Secretary for Petroleum Reserves Office of Naval Petroleum and Oil Shale Reserves U.S. Department of Energy Washington, D.C, “Strategic Significance of America’s Oil Shale Resource Volume I Assessment of Strategic Issues Final Report”, Marzo2004, http://www.fossil.energy.gov/programs/reserves/npr/publications/npr_strategic_significancev1.pdf

2 Evoluzione storica dei veicoli ibridi elettrici

La nascita dei primi veicoli elettrici affonda le proprie radici nel 19° secolo. Il primo veicolo elettrico a essere sviluppato risale intorno agli anni 30 e utilizzava batterie non ricaricabili; dovette quindi passare mezzo secolo prima che le batterie fossero sviluppate a sufficienza per permetterne l'impiego commerciale e consentire la diffusione dei veicoli elettrici [3]. Il successo di questi veicoli raggiunse l'apice nei primi decenni del 20° secolo per poi lasciare il passo ai veicoli a combustione interna.

Nonostante gli indubbi vantaggi della propulsione elettrica, la limitata autonomia, la necessità di ricaricare le batterie e i lunghi tempi di ricarica non fecero che indebolire il richiamo che i veicoli elettrici esercitavano sui consumatori.



Figura 2.1 Taxi New York 1901, veicolo elettrico a batteria

Per risolvere tali problemi, gli ingegneri pensarono di unire ai pregi del motore a scoppio, i vantaggi di un motore elettrico. L'unione dei due sistemi portò alla nascita di quello che oggi chiamiamo veicolo ibrido. Molti veicoli ibridi furono progettati a cavallo dei due secoli, alcuni dei quali presentati al Salone dell'automobile di Parigi e messi in produzione almeno su piccola scala.

Primi prototipi di veicolo ibrido

<i>Produttori o ingegneri</i>	<i>Paese</i>	<i>Anno</i>
Pieper	Francia	1898 ^a
Vendovelli & Priestly	Francia	1899 ^a
Jenatzy	?	1901 ^a
Krieger	Francia	1902
Lohner-Porsche	Germania	1903
Auto-Mixie	Germania	1906
Mercedes-Mixie	Germania	1907
Pope	Stati Uniti	1902 ^b
Baker	Stati Uniti	1917
Woods	Stati Uniti	1917

^a Prototipi presentati al Salone dell'automobile di Parigi

^b Prototipo prese fuoco nel primo test di prova

Tabella 2.1 Elenco prototipi veicoli ibridi [2]

I primi due veicoli ibridi di cui si hanno notizie furono mostrati al Salone di Parigi del 1899, il primo costruito dagli stabilimenti Pieper di Liegi, mentre il secondo costruito dalla Vendovelli and Priestly Electric Carriage Company in Francia. Il veicolo Pieper era un ibrido parallelo con un piccolo motore a benzina assistito da un motore elettrico e da batterie al piombo [1].

Quando la potenza richiesta al motore a scoppio era maggiore rispetto alla potenza nominale, il motore elettrico forniva la potenza addizionale necessaria. Questo veicolo oltre ad essere il primo ibrido è senza dubbio il primo veicolo con avviamento elettrico della storia.

L'altro veicolo introdotto al Salone di Parigi rappresentava invece il primo veicolo ibrido serie ed era un triciclo a motore derivato da un veicolo puramente elettrico.

Altri veicoli ibridi, sia di tipo parallelo sia serie, furono costruiti durante un periodo che va dal 1899 al 1914. Nonostante la frenatura elettrica fosse implementata a partire dai primi modelli, attuata tramite la cortocircuitazione pura dei morsetti o con l'interposizione di resistori, non esiste alcuna menzione di una possibile frenatura a recupero.

Questi primi prototipi non poterono competere a lungo con le grandi migliorie apportate ai motori a benzina che entrarono in commercio dopo la Prima Guerra Mondiale. I miglioramenti in termini di densità di potenza, che permisero motori a scoppio più piccoli ed efficienti, consentirono di eliminare i motori elettrici. I costi supplementari di un motore elettrico, uniti al costo e alla pericolosità delle batterie al piombo, segnarono la definitiva scomparsa dei veicoli ibridi dal mercato.

Il più grande problema che interessava queste automobili era senza ombra di dubbio la difficoltà di controllo delle macchine elettriche. L'elettronica di potenza non sarà, infatti, disponibile fino alla metà degli anni 60 e i primi motori elettrici erano controllati attraverso interruttori meccanici e resistori, limitando di fatto la funzionalità e l'operatività di questi veicoli.

Per sentir parlare ancora di veicoli ibridi è necessario attendere almeno cinquant'anni e le nuove problematiche sorte con l'embargo petrolifero e la carenza di combustibili durante gli anni 70.

Esattamente nel 1975, il Dr. Victor Wouk assieme ad alcuni colleghi rispolvera il concetto di veicolo ibrido costruendo una versione ibrido parallelo di una Buick Skylark. Caratterizzata da un motore a scoppio assistito da un motore in corrente continua e da batterie da 12 Volt per l'accumulo [1].

Il concetto di veicolo ibrido serie venne riesumato prima rispetto alla topologia parallelo nel 1967 dal Dr Ernest H. Wakefield, ma a causa di problemi tecnici tale progetto fu presto abbandonato [1].

Altri tentativi furono realizzati sul finire degli anni 70 e nei primi anni 80 ma a causa di una tecnologia ancora acerba, in particolar modo per quanto riguarda l'elettronica di potenza e le batterie, non ebbero fortuna.



Figura 2.2 Toyota Prius primo modello.

Il concetto di veicolo ibrido incontrò un interesse crescente a partire dagli anni 90 quando risultò chiaro che i veicoli puramente elettrici non avrebbero potuto ridurre in maniera efficiente i consumi.

Con una tecnologia ormai matura numerosi costruttori s'impegnarono nello sviluppo e nella ricerca dando origine a numerosi prototipi.

La pietra miliare per la diffusione dei veicoli ibridi è senza dubbio la commercializzazione da parte di Toyota della Prius, avvenuta nel 1997 e del successo commerciale che l'ha portata ad oggi fino alla terza generazione. Aprendo la strada a una corsa al veicolo ibrido che coinvolge tutte le case automobilistiche.

Bibliografia

- [1] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi, “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles”, CRC Press 2005, ISBN 0849331544.
- [2] Allen E. Fush, “Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation”, CRC Press 2009, ISBN 9781420075342.
- [3] James Larminie, John Lowry, “Electric vehicle technology explained”, John Wiley & Sons Ltd. 2003, ISBN 0470851635.
- [4] Iqbal Husain, “Electric and hybrid vehicle: design and fundamentals”, CRC Press 2005, ISBN 0849314666

3 L'efficienza dei veicoli ibridi

Un veicolo ibrido presenta molte caratteristiche e tecnologie che permettono di migliorare l'efficienza e l'autonomia dei veicoli convenzionali. Alcune delle caratteristiche sono specifiche dei veicoli ibridi e non possono essere trovati negli altri veicoli, mentre altre dagli effetti meno evidenti sono comuni a tutte e due le categorie.

~ 3.1 Tecnologie per l'incremento dell'efficienza esclusive dei veicoli ibridi

- Frenata a recupero d'energia

La frenata a recupero di energia permette di recuperare l'energia cinetica posseduta dal veicolo in fase d'arresto attraverso la frenatura elettrica. A differenza delle comuni frenature meccaniche che si basano sul fenomeno dell'attrito, nella frenatura elettrica il motore può operare come un generatore recuperando energia che può essere facilmente immagazzinata nel sistema d'accumulo.

Questo processo avviene attraverso l'inversione della coppia del motore come si può ben vedere dall'immagine seguente.

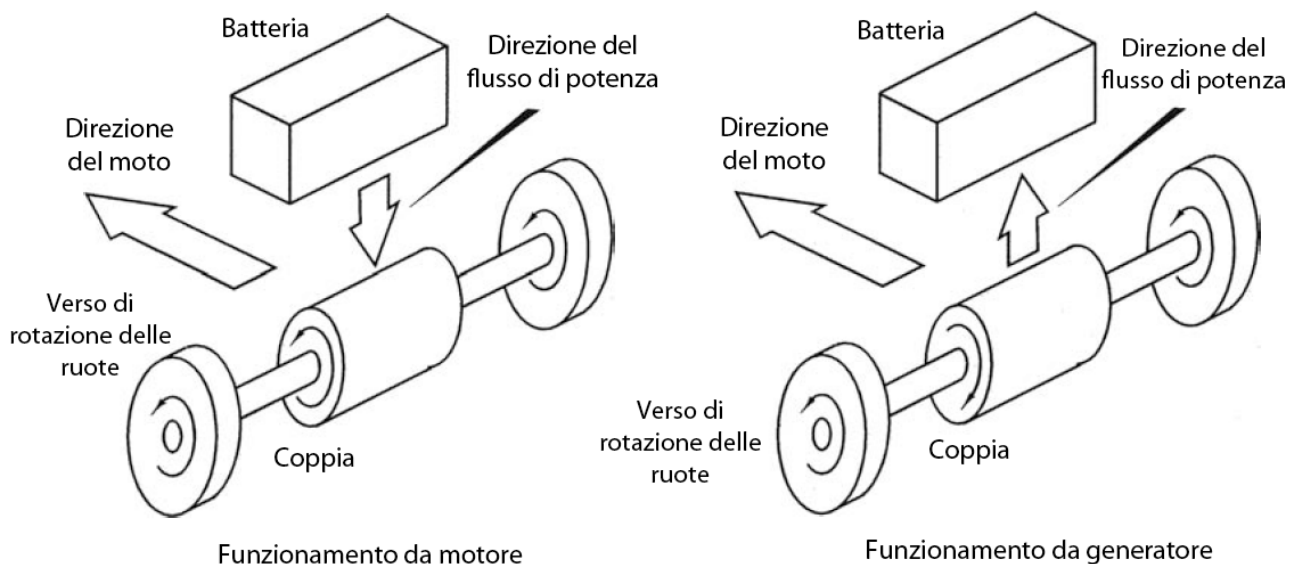


Figura 3.1 Frenatura rigenerativa

La frenatura rigenerativa permette di incrementare l'efficienza di un veicolo del 10-15 % [1], non è però utilizzabile singolarmente ma va affiancata da un sistema di frenatura meccanica.

- Sottodimensionamento del motore termico

La riduzione del motore a combustione interna è possibile grazie all'aggiunta di un motore elettrico e del sistema accumulo. Quando la potenza richiesta eccede la potenza nominale del motore a combustione è possibile coprire tali punte con il motore elettrico.

Un motore più piccolo presenta potenze per gli ausiliari inferiori, meno perdite e quindi una maggiore efficienza complessiva.

Come è possibile vedere dalla figura 3.2, dove a velocità di rotazione costante è possibile notare i benefici del sottodimensionamento del motore in termini di consumi e autonomia.

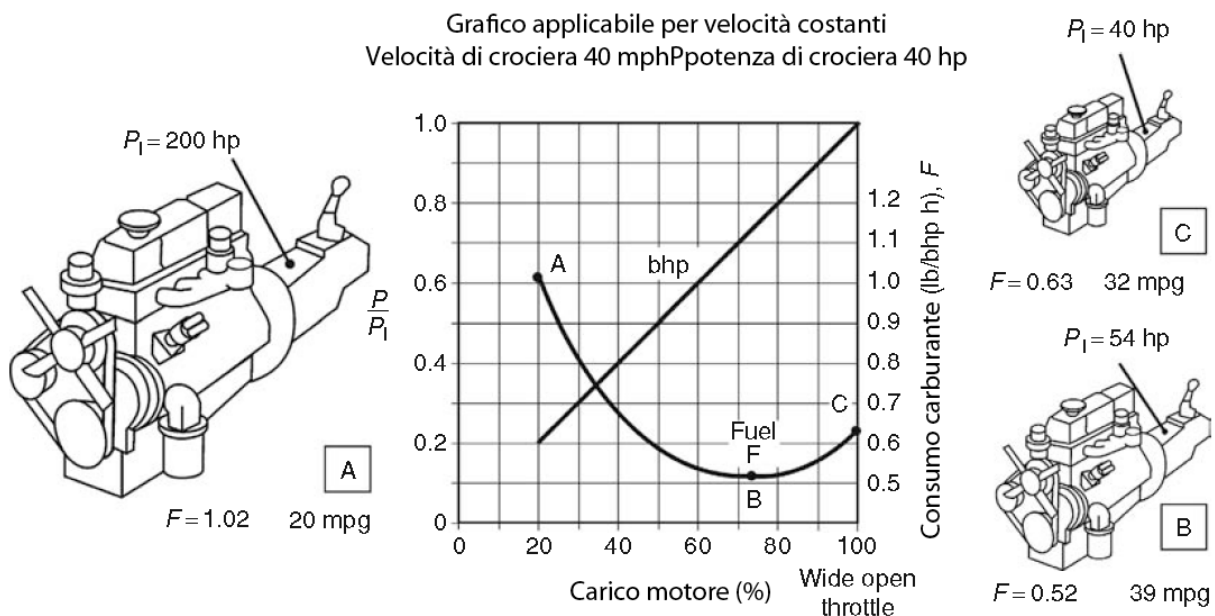


Figura 3.2 Benefici del sottodimensionamento del motore [1]

Facendo un esempio prendiamo il motore A (figura 2) di 200 cavalli di potenza, il carico del motore sarà:

$$\frac{P}{P_1} = \frac{40}{200} = 0.2 = 20\%$$

Corrispondente ad un consumo di 20 miglia per gallone, se adesso riduciamo il motore ad una potenza di 54 cavalli otterremo un consumo di 39 miglia per gallone.

Va inoltre preso in considerazione l'impossibilità di ridurre eccessivamente la potenza del motore, perché come mostrato in figura 3.2 dal motore c, si ottengono risultati controproducenti.

- Funzionamento puramente elettrico del veicolo

L'uso della modalità completamente elettrica nelle fasi di accelerazione del veicolo e per regimi di velocità ridotti consente un notevole incremento dell'efficienza del veicolo stesso, laddove un avviamento di un veicolo convenzionale comporta il funzionamento del motore termico in una zona di basso rendimento.

Meno sensibile a questo problema pertanto risulta essere il motore elettrico, che consente inoltre una coppia all'avviamento sicuramente maggiore, migliorando le performance del veicolo.

~ 3.2 Tecnologie minori

- Funzionalità di Start/Stop

La funzionalità di Start/Stop consente di spegnere il motore termico quando il veicolo è fermo, una situazione tipicamente urbana, dove il veicolo è costretto a fermarsi ripetutamente .

L'applicazione di questa tecnologia consente di migliorare l'efficienza del veicolo del 5-8 % [1].

- Gestione elettrica degli ausiliari

In un veicolo convenzionale il motore alimenta, sia direttamente che attraverso l'alternatore, tutta una serie di servizi ausiliari, come si può vedere nella tabella successiva e nella figura 3.3.

Servizi ausiliari			
Sistema d'iniezione	Chiusura centralizzata	Sospensioni attive	Ventole raffreddamento motore
Riscaldamento sedili	Sghiacciamento cristalli	Specchietti motorizzati	Ventilazione abitacolo
Finestrini elettrici	Luci	Riscaldamento elettrico marmitta catalitica	Ventilazione abitacolo
Sistemi di navigazione	Sistemi d'intrattenimento	Aria condizionata	Riscaldamento
Pompe olio	Pompe acqua	ABS e controllo stabilità	Pompe carburante

Tabella 3.1 Elenco servizi ausiliari di un veicolo convenzionale

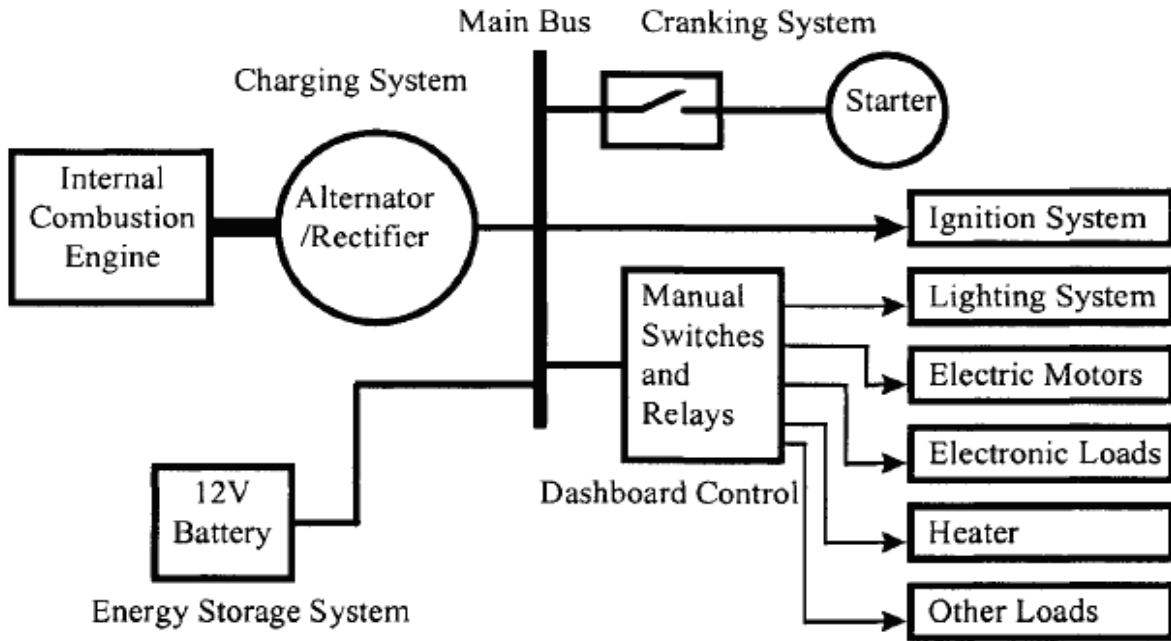


Figura 3.3 Tipico sistema di distribuzione a 14 V DC [3]

Disaccoppiare il motore dai servizi ausiliari mediante un motore elettrico consente di aumentare in maniera significativa l'efficienza del veicolo. In primis perché si eliminano tutta una serie di componenti come cinghie e ingranaggi, secondo permette agli ausiliari stessi mossi da un motore elettrico di lavorare in una range di velocità limitata e in una zona di massima efficienza.

L'effetto pratico di questa soluzione è efficacemente illustrato nella figura successiva [1].

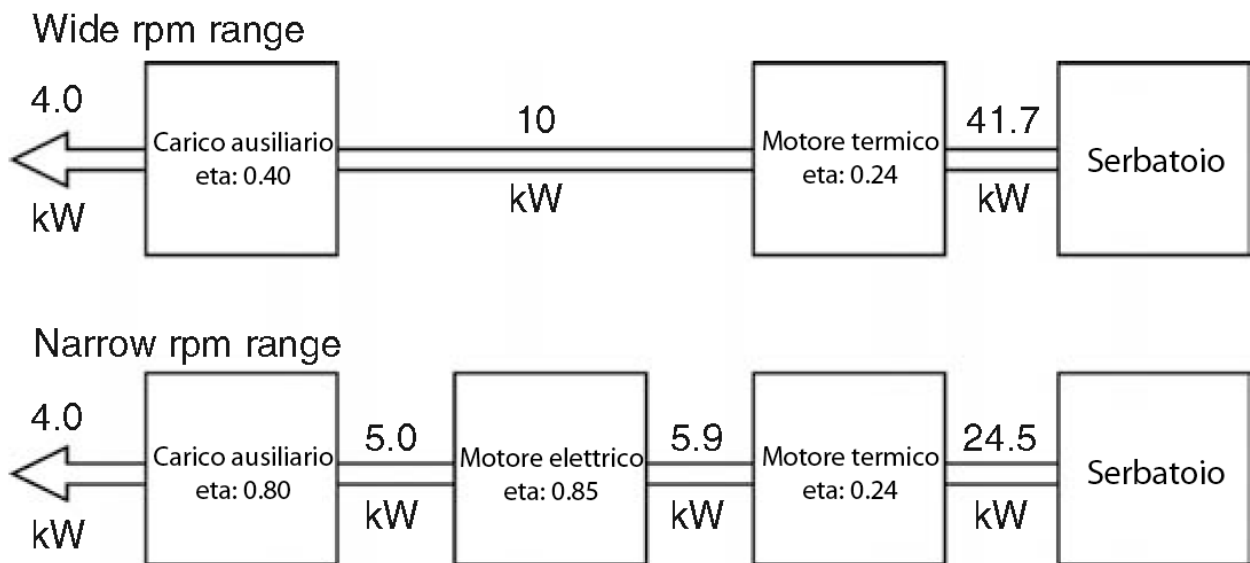


Figura 3.4 Disaccoppiamento degli ausiliari dal motore termico

~ 3.3 Tecnologie per l'incremento dell'efficienza comuni ai veicoli ibridi e convenzionali

- Impianto sterzante elettrico

Nelle automobili convenzionali, lo sterzo idraulico utilizza parte dell'energia proveniente dall'albero motore per sterzare le ruote. L'impiego di uno sterzo elettroattuato permette di incrementare l'efficienza complessiva e risulta applicabile facilmente anche a veicoli convenzionali.

- Preriscaldamento del motore

Riscaldare il motore consente di limitare le emissioni in fase di accensione e di ridurne i consumi.

- Aerodinamica

Un modo per aumentare l'efficienza dei veicoli è quello di ridurre la resistenza aerodinamica del veicolo, per questo sono necessari studi di aerodinamica in galleria del vento al fine di ottimizzare la forma del veicolo e di conseguenza il coefficiente di penetrazione aerodinamica del veicolo.

- Attrito dei pneumatici

Come per la resistenza aerodinamica, è possibile ridurre l'attrito delle gomme con l'asfalto utilizzando pneumatici a basso attrito. L'impiego di questi pneumatici è a discapito della manovrabilità del veicolo ed è fattibile solo per veicoli di peso modesto.

- Riduzione del peso della vettura
- Incremento dell'efficienza del motore termico mediante l'utilizzo di motori di nuova generazione
- Miglioramento dei sistemi di lubrificazione
- Miglioramento dei carburanti utilizzati

Bibliografia

- [1] Allen E. Fush, "Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation", CRC Press 2009, ISBN 9781420075342.
- [2] Ali Emadi, "Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives", CRC Press 2005, ISBN 9780824723613.
- [3] Ali Emadi, Mehrdad Ehsani, John M. Miller "Vehicular Electric Power Systems: Land, Sea, Air and space vehicles", Marcel Dekker Inc., ISBN 0824747518.

4 Topologia dei veicoli ibridi elettrici

I veicoli convenzionali con motori a combustione interna forniscono buone performance e una lunga autonomia operativa, grazie all'elevata densità di energia che contraddistingue i combustibili fossili.

Ad ogni modo i veicoli tradizionali portano con se numerosi svantaggi tra i quali, la scarsa efficienza e le emissioni inquinanti. Le principali cause della bassa efficienza sono riferibili a:

- 1) le caratteristiche dei motori a combustione non coincidono con i reali requisiti operativi, in particolare modo la zona di massima efficienza del motore viene difficilmente raggiunta durante il funzionamento, come si può ben vedere dalla figura successiva;

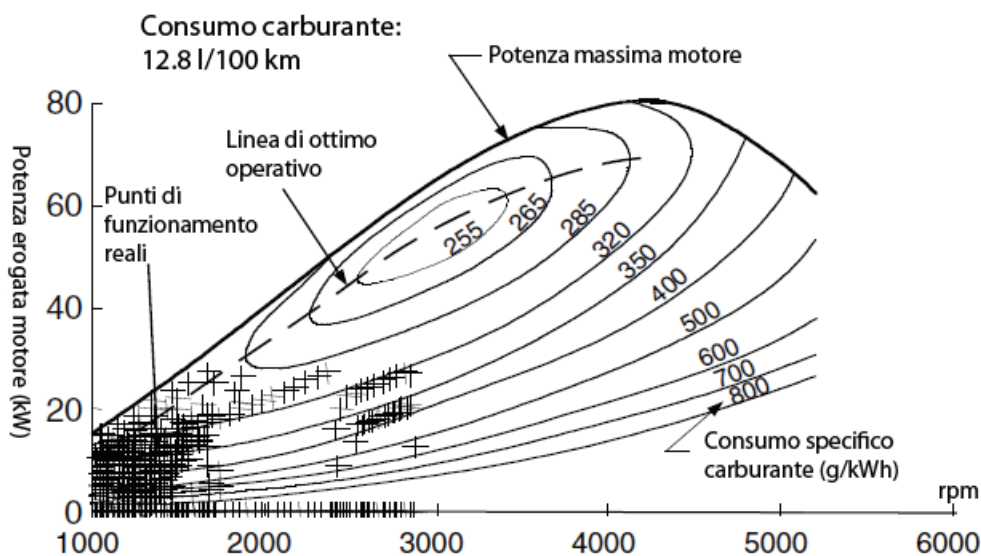


Figura 4.1 Consumo carburante e punti operativi di un motore per un ciclo di guida urbano EPA FTP75 sovrapposto ad una mappa d'efficienza di un motore

- 2) dissipazione dell'energia cinetica del veicolo durante la frenata, specialmente in aree urbane;
- 3) scarsa efficienza della trasmissione meccanica in relazione a profili di guida caratterizzati da ripetute accelerazioni e decelerazioni.

D'altra parte l'utilizzo di veicoli completamente elettrici comporta alcuni vantaggi come l'alta efficienza energetica e le emissioni inquinanti pressoché nulle, a discapito delle performance e in particolar modo dell'autonomia.

I veicoli ibridi che utilizzano due sorgenti di potenza fanno propri i vantaggi, sia dei veicoli con motore a combustione che dei veicoli elettrici, mitigandone i difetti.

Nonostante i notevoli vantaggi anche i veicoli ibridi presentano delle criticità, soprattutto per quanto riguarda i prezzi e il peso aggiuntivo.

I prezzi dei veicoli ibridi sono in generale superiori rispetto ai veicoli convenzionali, tali costi aggiuntivi secondo alcuni studi [9] possono essere stimati tra i 2500 \$ e i 6700 \$ a seconda del livello di ibridazione.

Per livelli di ibridazione molto spinta i benefici legati alla semplificazione del sistema di trazione e all'alleggerimento del veicolo tendono a compensare l'aumento dei costi.

Prendendo in considerazione livelli di ibridazione medi, il costo aggiuntivo può essere ammortizzato facilmente grazie al risparmio sul carburante.

Categoria costi	Veicolo convenzionale	Veicolo ibrido elettrico
Costo totale di produzione	5741\$	7587\$
Costi di divisione (ingegneria, test, pubblicità)	3761\$	4124
Costi d'azienda (ricerca e sviluppo, capitali, dirigenza)	2222\$	2300\$
Costo del denaro	172\$	206\$
Profitto azienda	368\$	440\$
Costo azienda (prezzo al rivenditore)	12265\$	14656\$
Costo rivenditore	2031\$	2246\$
Prezzo suggerito dal produttore	14295\$	16902\$
Spese di spedizione	365\$	377\$
Costo al consumatore (comprensivo di spese di spedizione e tassa 3%)	15100\$	17797\$

Tabella 4.1 Esempio costi di produzione e prezzo al dettaglio di una GM Cavalier [9]

L'aumento del peso del veicolo ibrido rispetto a quello convenzionale viene in parte compensato dall'alleggerimento della parti meccaniche, in primis con il sottodimensionamento del motore e con la semplificazione del sistema di trasmissione.

~ 4.1 Concetto di trazione ibrida elettrica

Il sistema di trazione di qualunque veicolo deve soddisfare i seguenti requisiti :

- sviluppare sufficiente potenza in maniera tale da soddisfare le performance del veicolo;
- trasportare sufficiente energia allo scopo di supportare il veicolo durante la guida;
- operare ad alta efficienza;
- ridurre al minimo l'emissioni inquinanti.

Un veicolo che ha due o più sorgenti di energia può essere definito ibrido e in particolare un veicolo caratterizzato da un sistema di conversione e accumulo elettrico è definito come ibrido elettrico [7].

Tale sistema ibrido solitamente consiste di due sorgenti di energia, infatti l'utilizzo di più di due sorgenti complicherebbe la topologia e la gestione del sistema senza reali vantaggi.

Allo scopo di recuperare parte dell'energia che è dissipata sotto forma di calore nei veicoli convenzionali, il sistema di trazione di un veicolo ibrido elettrico presenta sorgenti e convertitori bidirezionali.

La figura 4.2 esplica il concetto di trazione ibrida e i differenti percorsi che i flussi di potenza possono seguire.

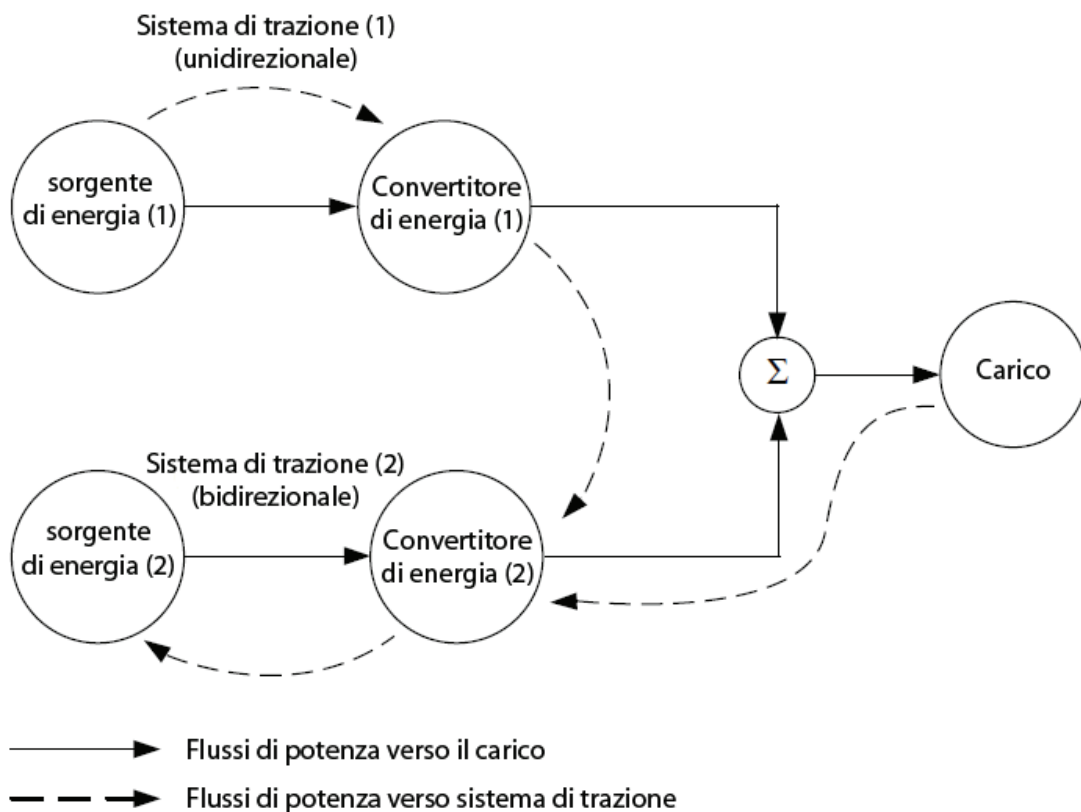


Figura 4.2 Funzionamento concettuale di un sistema di trazione ibrido

Risultano disponibili numerosi percorsi e modalità di funzionamento [2]:

- 1) Il sistema di trazione 1 da solo fornisce potenza al carico;
- 2) Il sistema di trazione 2 da solo fornisce potenza al carico;
- 3) Entrambi i sistemi di trazione forniscono potenza al carico allo stesso tempo;
- 4) Il sistema di trazione 2 riceve potenza dal carico (frenata a recupero di energia);
- 5) Il sistema di trazione 2 ottiene potenza dal sistema 1;
- 6) Il sistema di trazione 2 ottiene potenza dal sistema 1 e dal carico;
- 7) Il sistema di trazione 1 fornisce potenza al carico e al sistema di trazione 2 contemporaneamente;
- 8) Il sistema di trazione 1 fornisce potenza al sistema 2, il quale poi fornisce potenza al carico;
- 9) Il sistema di trazione 1 consegna potenza al carico, il quale poi fornisce potenza al sistema 2.

Facendo riferimento ad un sistema ibrido costituito da un motore a combustione (sistema di trazione 1) e da un motore elettrico più batteria di accumulo (sistema di trazione 2), la modalità di funzionamento (1) rappresenta il classico funzionamento di un veicolo convenzionale. Utilizzabile quando le batterie sono ormai scariche e il motore non ha sufficiente potenza disponibile per la ricarica oppure quando le batterie sono completamente cariche e il motore a scoppio può far fronte singolarmente alle richieste del carico.

La modalità (2) rappresenta il funzionamento puramente elettrico, laddove il motore termico è spento, utile durante regimi di velocità molto bassi (per esempio durante tratti urbani) difficilmente mitigabili con gli elevati consumi e emissioni di un motore a combustione.

La terza modalità rappresenta appieno il funzionamento ibrido del sistema, dove una grande quantità di potenza è necessaria, esempio per grandi accelerazioni o tratti in forte salita.

La modalità successiva (4) è essenzialmente una frenata a recupero di energia, l'energia cinetica e potenziale del veicolo è recuperata grazie al funzionamento da generatore del motore elettrico e conservata nelle batterie per un successivo riutilizzo.

Quando il veicolo è fermo, in fase di coasting o durante una discesa, in assenza di flussi di potenza che vanno o vengono dal motore elettrico, il motore a scoppio ricarica le batterie secondo la modalità (5).

La sesta modalità contempla, mediante contemporaneo utilizzo della frenatura a recupero e del motore a scoppio, la ricarica delle batterie.

La modalità (7) consiste nella fornitura di potenza da parte del motore termico al carico e alle batterie, mentre nel funzionamento seguente il motore carica le batterie e successivamente le batterie forniscono potenza al carico. Questa modalità di funzionamento (8) è senza ombra di dubbio la meno efficiente in quanto comporta una doppia conversione di energia.

Nell'ultima modalità (9), la potenza fluisce dal motore termico al motore elettrico passando per il veicolo, questa situazione è tipica nel caso in cui i due sistemi di trazione siano montati separatamente sull'asse anteriore e posteriore.

Le varie modalità operative di un veicolo ibrido consentono una maggiore flessibilità del sistema di trazione, con l'opportuna configurazione e relativo controllo è possibile ottimizzare le performance complessive del veicolo, l'efficienza e l'emissioni inquinanti.

L'utilizzo di ciascun sistema di trazione nella regione di ottima efficienza rappresenta una condizione essenziale per il raggiungimento degli obiettivi prefissati. Un motore a combustione interna, generalmente presenta una regione di massima efficienza piuttosto limitata (vedi figura 4.1) e soffre notevolmente le brusche variazioni di potenza richiesta. Al contrario, un motore elettrico (vedi figura 4.3) sopporta meglio tali variazioni e il suo funzionamento fuori dalle zone di massimo rendimento ne risente meno.

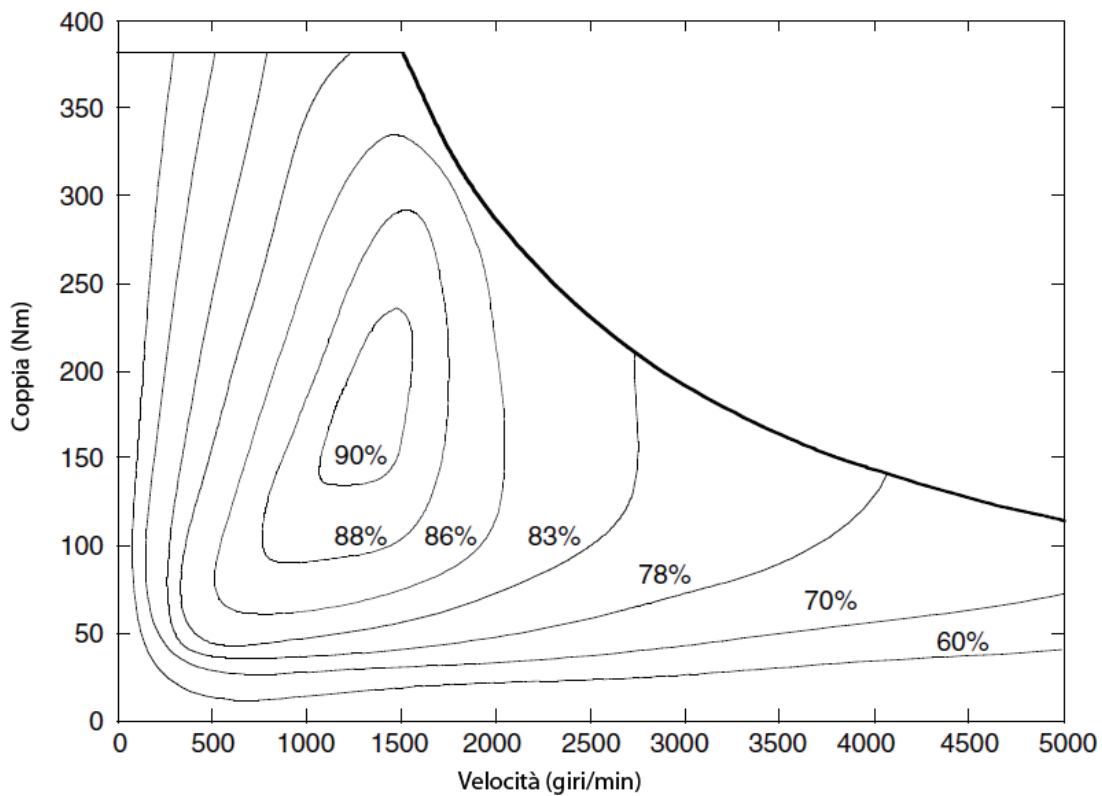


Figura 4.3 Tipica efficienza di un motore elettrico

La potenza richiesta dal veicolo varia casualmente in un contesto reale, a causa delle frequenti accelerazioni, decelerazioni, salite e discese. Tale potenza può essere suddivisa in due componenti: una componente media costante e una componente dinamica a media nulla [6].

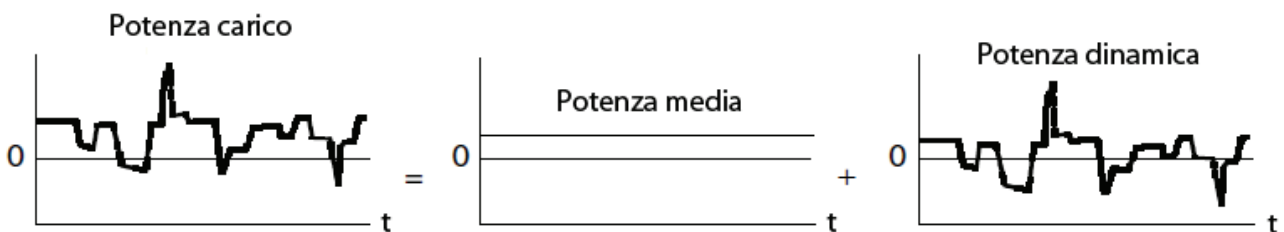


Figura 4.4 Potenza richiesta dal veicolo e la sua scomposizione

In un veicolo ibrido, i motori termici o le celle a combustibile possono essere utilizzati per fornire la potenza media necessaria al carico, mentre il motore elettrico può facilmente fornire la potenza dinamica.

L'utilizzo di questa strategia consente di ridurre il dimensionamento dei componenti, in particolar modo per il motore a combustione, rispetto ad un dimensionamento che tenga conto anche delle esigenze dinamiche.

~ 4.2 Architettura dei veicoli ibridi

L'architettura dei veicoli ibridi è formalmente definita dal modo in cui i componenti, che costituiscono il sistema di trazione, sono collegati tra di loro. Questo definisce in primo luogo i percorsi che i flussi di potenza seguono e di conseguenza le modalità di controllo.

Tradizionalmente i veicoli ibridi vengono classificati in due grandi famiglie: ibrido serie e ibrido parallelo.

In tempi recenti a queste tipologie se ne sono affiancate molte altre che possono essere raggruppate in :ibrido serie-parallelo e ibrido complesso, come mostra la figura qui di seguito [3,6].

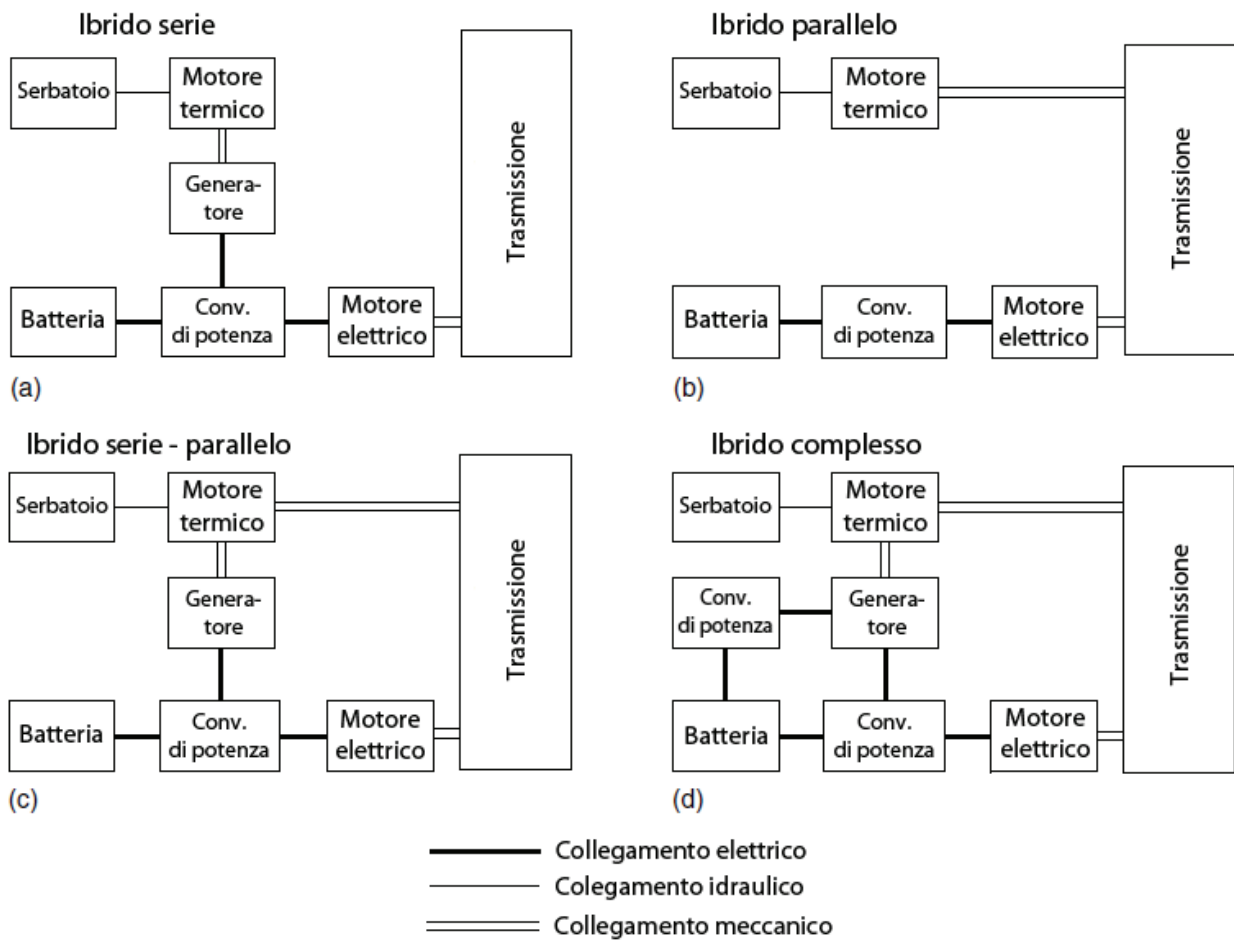


Figura 4.5 Classificazione e topologia veicoli ibridi

Il motore a combustione interna può essere sostituito da sorgenti differenti come ad esempio le celle a combustibile, lo stesso dicasi delle batterie rimpiazzabili con supercondensatori, volani e via dicendo.

~ 4.2.1 Sistema di trazione ibrido serie

Un sistema di trazione ibrido serie è costituito da due sorgenti di potenza che alimentano un singolo motore elettrico, responsabile della locomozione del veicolo.

La struttura generale di un veicolo ibrido serie è mostrata in figura 4.6.

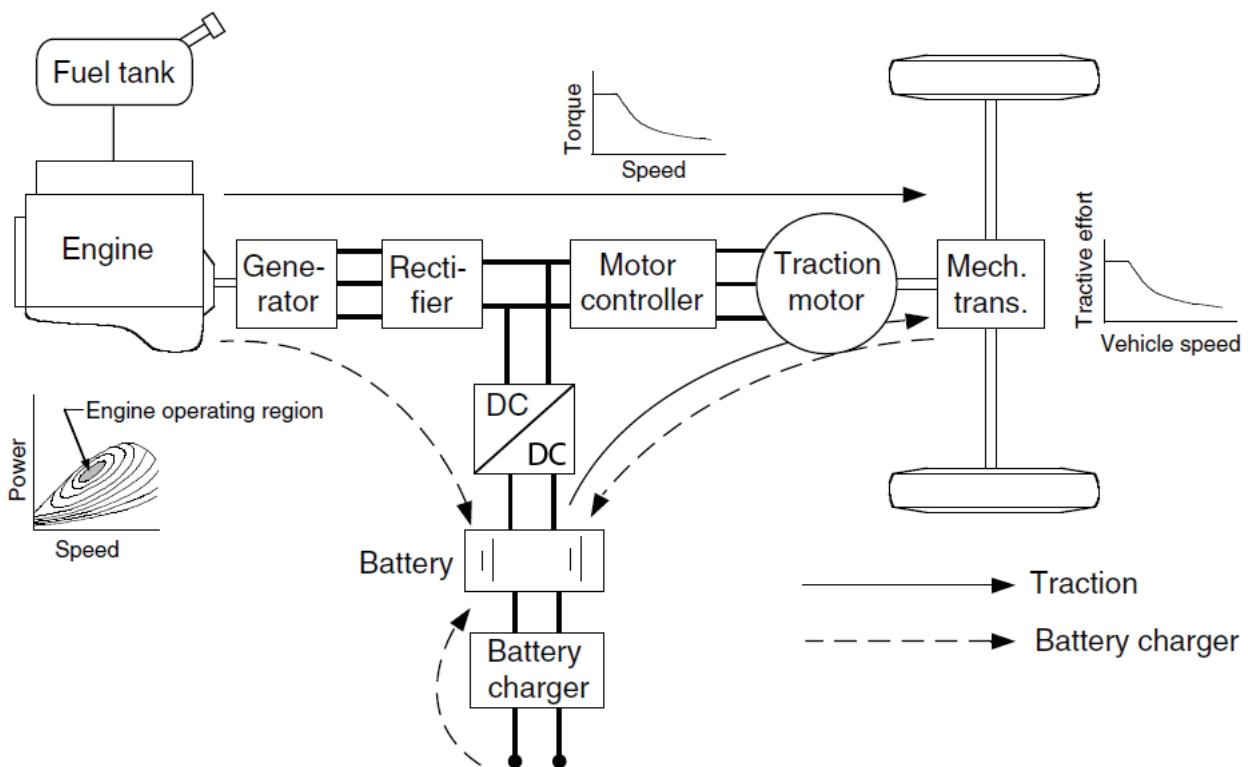


Figura 4.6 Configurazione classica di un sistema di trazione ibrido serie

La sorgente di energia unidirezionale è rappresentata dal serbatoio mentre il convertitore d'energia unidirezionale è costituito dal motore termico accoppiato al generatore elettrico.

L'uscita del generatore è connessa ad un bus DC attraverso un raddrizzatore, su tale bus si trova la sorgente di energia bidirezionale, rappresentata da una batteria interfacciata ad un convertitore DC/DC

Interfacciato al bus troviamo infine il motore elettrico di trazione, avente il compito di convertire l'energia elettrica in energia meccanica.

La batteria in alcune soluzioni realizzative può essere ricaricata mediante l'ausilio di una rete esterna (veicoli plug-in).

I veicoli ibridi serie potenzialmente hanno le seguenti modalità operative:

- 1) Modalità puramente elettrica: il motore a combustione è spento e il veicolo è mosso esclusivamente attraverso le batterie;
- 2) Modalità puramente termica: la potenza di trazione necessaria al veicolo per muoversi proviene solamente dal motore termico, mentre le batterie non forniscono alcun contributo;
- 3) Modalità ibrida: il veicolo è mosso da entrambe le sorgenti;
- 4) Modalità motore termico e ricarica batterie: il motore a combustione muove il veicolo e ricarica le batterie;
- 5) Modalità frenata a recupero: il motore termico è spento mentre il motore elettrico funziona da generatore in fase di frenata. La potenza generata ricarica le batterie;
- 6) Modalità ricarica batterie: il motore di trazione non riceve energia mentre l'accoppiata motore termico – generatore ricarica le batterie ;
- 7) Modalità di ricarica batterie ibrida: Sia il motore elettrico che termico caricano le batterie.

I vantaggi di un veicolo ibrido elettrico serie rispetto ad un veicolo convenzionale sono:

- Il motore a combustione è completamente disaccoppiato meccanicamente dal veicolo, perciò può operare in prossimità della zona a massima efficienza come visto in figura 4.1 .
L'efficienza e le emissioni del motore possono essere ulteriormente migliorate attraverso il corretto dimensionamento del motore.
Il disaccoppiamento del motore dal resto del veicolo permette inoltre di utilizzare motori ad alta velocità, laddove in un veicolo convenzionale non sono utilizzabili a causa dell'accoppiamento meccanico o della loro dinamica lenta come per esempio il motore Stirling [6];
- L'utilizzo di motori elettrici non necessita di trasmissioni e cambi multimarcia, perciò la costruzione della trasmissione risulta largamente semplificata con notevoli benefici sui costi.
Ulteriore miglioria è rappresentata dall'uso di due motori, uno per ruota, anziché uno e dall'eliminazione del differenziale. Questa soluzione permette il disaccoppiamento delle velocità tra le due ruote come un normale differenziale ma con l'aggiunta della possibilità di effettuare un controllo di trazione separato per ciascuna ruota.
Espandendo tale concetto alle quattro ruote è possibile ottenere un veicolo a quattro ruote motrici, senza l'utilizzo di complicati sistemi di trasmissione e differenziali;
- L'utilizzo di strategie di controllo semplificate, grazie al disaccoppiamento reso possibile dalla trasmissione elettrica.

A questi vantaggi vanno però affiancati i svantaggi che derivano dall'utilizzo di veicoli ibridi serie:

- L'energia proveniente dal motore termico è convertita due volte (da meccanica a elettrica nel generatore e da elettrica a meccanica nel motore). L'inefficienza del generatore e del motore portano ad una diminuzione del rendimento complessivo e a perdite che possono essere significative;
- L'aggiunta di un generatore comporta un incremento del peso e dei costi complessivi;
- Il motore elettrico di trazione deve essere dimensionato per soddisfare la massima potenza richiesta dal veicolo.

~ 4.2.2 Sistema di trazione ibrido parallelo

Il sistema di trazione ibrido parallelo si differenzia dal sistema serie per l'assenza di disaccoppiamento meccanico tra motore termico e veicolo. In questa topologia il motore a combustione partecipa direttamente alla trazione meccanica del veicolo, come in una automobile convenzionale.

Nel suo funzionamento il motore è assistito da un motore elettrico meccanicamente accoppiato alla trasmissione.

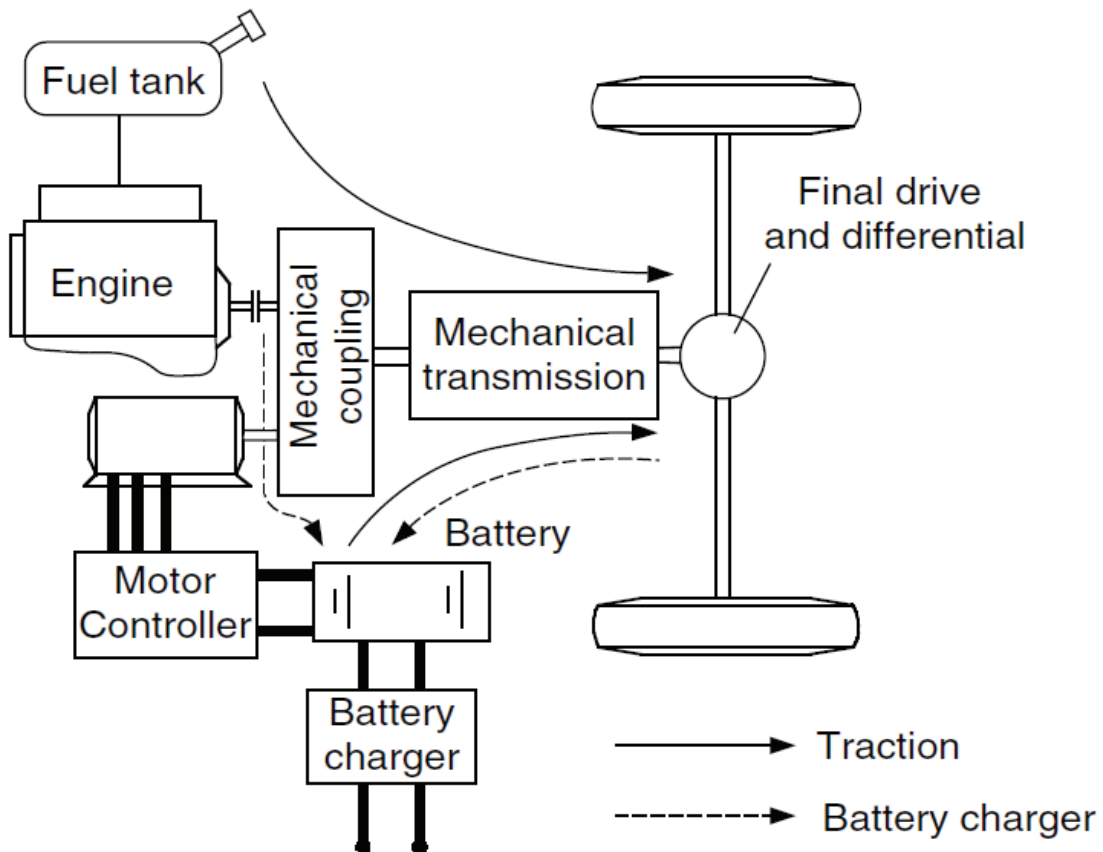


Figura 4.7 Configurazione classica di un sistema di trazione ibrido parallelo

La combinazione e la modalità di accoppiamento del motore termico e elettrico portano alla differenziazione di numerose tipologie di veicoli ibridi parallelo.

L'accoppiamento meccanico può avvenire attraverso due modalità:

- Accoppiamento in coppia;
- Accoppiamento in velocità;
- Accoppiamento in coppia e velocità.

L'accoppiamento in coppia somma entrambi i contributi dei due motori per muovere il veicolo oppure può dividere la coppia del motore termico in due componenti, una destinata alla trazione del veicolo e una alla ricarica delle batterie. La figura 4.8 mostra concettualmente l'accoppiamento meccanico in coppia [6].

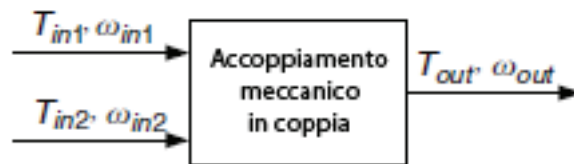


Figura 4.8 Schema d'accoppiamento meccanico in coppia

Supponendo trascurabili le perdite legate all'attrito, la coppia e la velocità d'uscita possono essere descritte come:

$$T_{out} = K_1 T_{in1} + K_2 T_{in2} \quad \omega_{out} = \frac{\omega_{in1}}{K_1} = \frac{\omega_{in2}}{K_2}$$

Esistono varie configurazioni di accoppiamento, classificabili in sistemi a singolo albero o a due alberi. In ogni categoria, la trasmissione è posizionata in differenti posizioni e realizzata con soluzioni diverse, risultato di caratteristiche di trazione differenti.

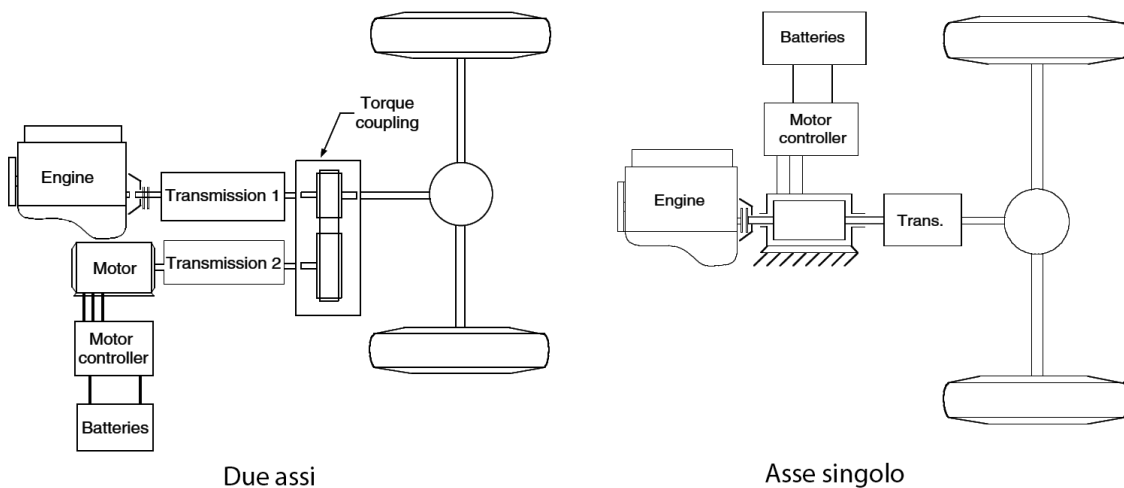


Figura 4.9 Accoppiamento ad asse singolo e a due assi

L'accoppiamento in velocità rappresenta il duale dell'accoppiamento in coppia, sempre trascurando le perdite il suo funzionamento può essere descritto come [6]:

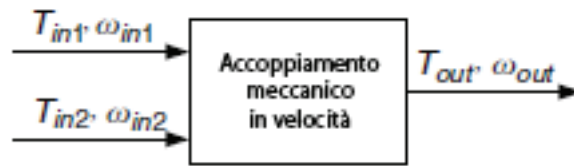


Figura 4.10 Schema d'accoppiamento meccanico in velocità

$$\omega_{out} = K_1 \omega_{in1} + K_2 \omega_{in2} \qquad T_{out} = \frac{T_{in1}}{K_1} = \frac{T_{in2}}{K_2}$$

L'accoppiamento è realizzato utilizzando una trasmissione planetaria oppure attraverso l'utilizzo di un motore elettrico, il cui statore a differenza delle macchine elettriche classiche può ruotare.

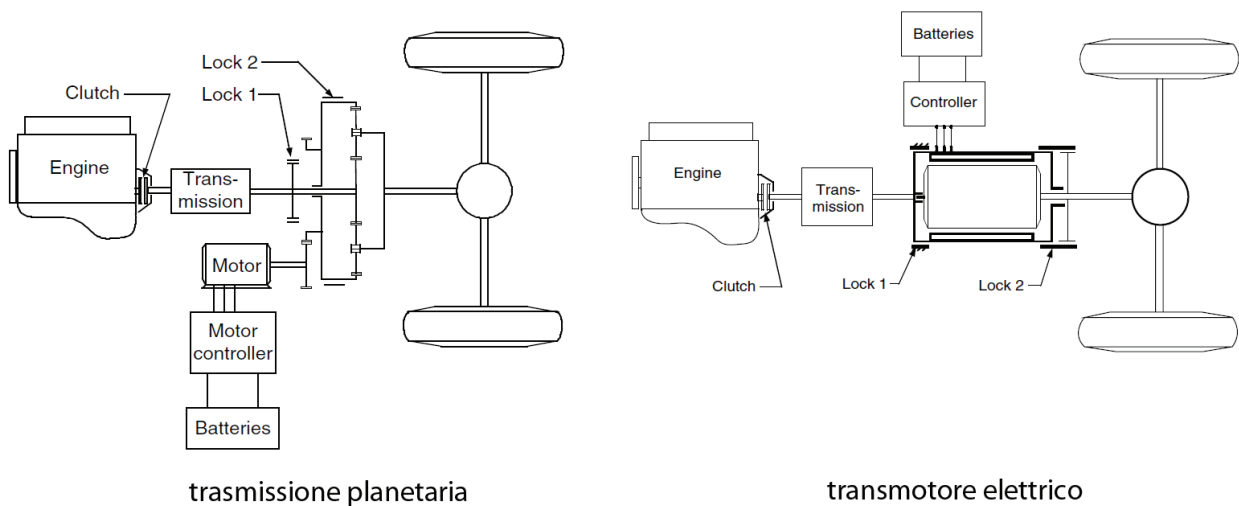


Figura 4.11 Esempio di accoppiamento con trasmissione planetaria e transmotore

L'unione dei 2 metodi di accoppiamento meccanico consente di realizzare un sistema di trazione ove sia possibile scegliere la tipologia più adatta da utilizzare in ogni contesto.

Questa realizzazione porta con sé notevoli vantaggi tra cui la possibilità di determinare le modalità di funzionamento più opportuna e di conseguenza l'ottimizzazione delle performance.

Per esempio durante l'avviamento è consigliabile utilizzare un accoppiamento in coppia o laddove risulti necessaria una forte accelerazione. D'altra parte l'utilizzo di un accoppiamento in velocità è senza'altro più adatto in un funzionamento autostradale dove le velocità raggiunte sono considerevoli.

Lo svantaggio di questa soluzione senz'altro risiede nell'elevata complessità costruttiva e di controllo del sistema, come si può ben vedere dalla figura seguente.

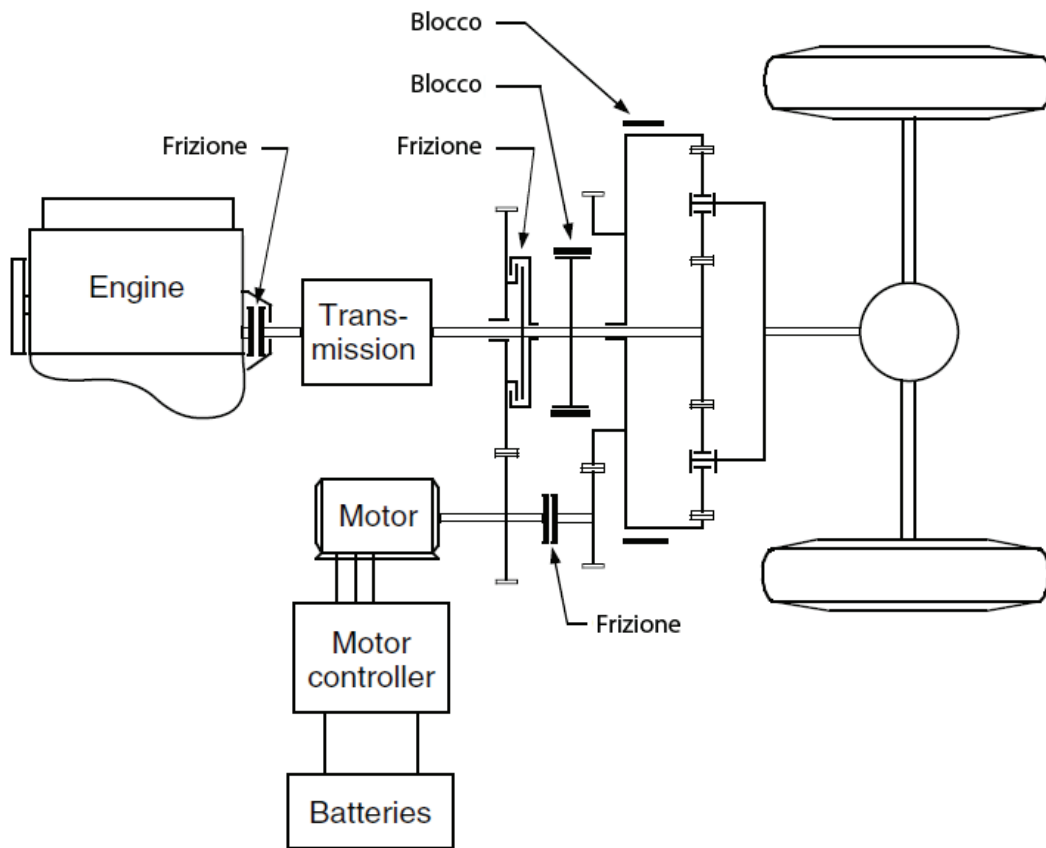


Figura 4.12 Esempio di accoppiamento in coppia e velocità mediante trasmissione planetaria

Le modalità operative conseguibili da un veicolo ibrido parallelo, in stretta similitudine con il veicoli serie, sono:

- 1) Funzionamento puramente elettrico;
- 2) Funzionamento puramente termico;
- 3) Funzionamento ibrido;
- 4) Frenata a recupero di energia;
- 5) Ricarica delle batterie mediante motore a combustione.

~ 4.2.3 Sistema di trazione ibrido serie-parallelo

La configurazione serie-parallelo combina le caratteristiche e i vantaggi del sistema di trazione serie e di quello parallelo, al contempo però necessita di un collegamento meccanico in più rispetto al veicolo serie e un generatore addizionale rispetto alla topologia parallelo. Risulta quindi più complicato e costoso da realizzare e nondimeno da controllare. Le varie modalità di funzionamento possono essere classificate in due gruppi principali: funzionamento prevalentemente elettrico, quando il motore elettrico funziona più del termico e viceversa funzionamento prevalentemente termico quando il motore a combustione funziona più dell'elettrico. L'implementazione di veicoli serie-parallelo in applicazioni reali è nell'ultimo periodo in ascesa come dimostra l'adozione di tale tipologia nella Toyota Prius® [8].

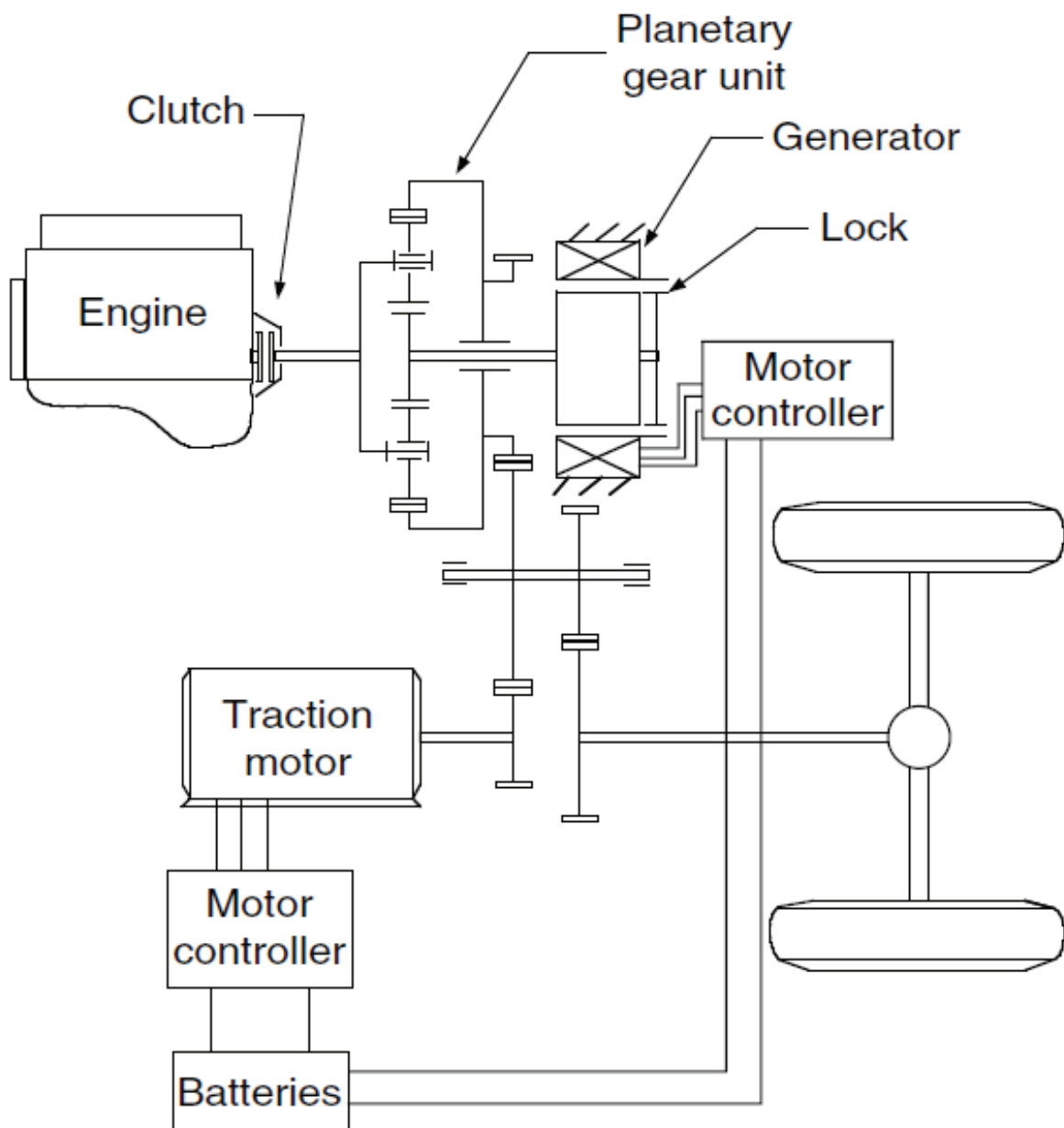


Figura 4.13 Topologia di massima di una Toyota Prius

~ 4.2.4 Sistema di trazione ibrido complesso

Come il nome lascia presagire, il sistema utilizza una configurazione complessa che non può essere classificata nelle tre categorie precedenti. I sistemi ibridi complessi sono simili ai sistemi serie-parallelo, dato che presentano un collegamento meccanico complesso e un generatore elettrico aggiuntivo (vedi figura 4.5).

La differenza risiede essenzialmente nel flusso bidirezionale di potenza nel generatore, cosa che non avviene nel sistema serie-parallelo. Questa bidirezionalità permette delle modalità operative versatili, consentendo un trazione a tre, utilizzando il motore termico e due motori elettrici [1].

Lo sviluppo di sistemi complessi è soprattutto focalizzato su sistemi di propulsione a assi separati, cioè l'asse anteriore e posteriore sono mossi da sistemi di trazione separati.

Le modalità di funzionamento, di questi tipo di veicoli ibridi, si differenziano in base al fatto che il sistema di trazione anteriore sia ibrido e quello posteriore elettrico oppure viceversa.

Le modalità di funzionamento comunque sono riconducibili alle seguenti sei modalità.

Durante l'avvio del veicolo a motore termico spento, le batterie forniscono l'energia elettrica per alimentare il motore elettrico anteriore e posteriore, che separatamente muovono il veicolo.

Per accelerazioni sostenute, entrambi i motori elettrici e il motore termico sostengono la progressione del veicolo. Questa modalità operativa coinvolge l'ausilio di tre motori per muovere il veicolo.

Durante un ciclo di guida normale o in fase di ricarica della batteria, la potenza prodotta dal motore a combustione viene divisa tra le esigenze di trazione del veicolo e la ricarica delle batterie. Le due operazioni vengono suddivise tra il motore elettrico anteriore e quello posteriore.

A basso carico la batteria alimenta uno solo dei motori elettrici mentre l'altro è spento, contemporaneamente anche il motore termico è spento.

Durante le frenate e le decelerazioni entrambi i motori elettrici effettuano la frenatura a recupero di energia, ricaricando contemporaneamente le batterie.

L'ultima modalità operativa rappresenta senz'altro una caratteristica unica rispetto alle altre topologie, essa consiste infatti nel bilanciamento degli assi, riconducibile al controllo di trazione.

Se le ruote di uno degli assi si trovano in situazione di scivolamento, il motore elettrico di tale asse funzionerà da generatore recuperando energia che verrà convogliata nell'altro motore per effettuare il bilanciamento degli assi.

I benefici di questa topologia si riscontrano nell'alleggerimento del sistema di trasmissione e nell'incremento di flessibilità del veicolo.

Gli svantaggi ricadono anch'essi nell'aumento della complessità realizzativa e di controllo del sistema e nel aumento dei costi.

~ 4.3 Classificazione dei veicoli ibridi in funzione del grado di ibridazione

I veicoli ibridi elettrici possono essere classificati in funzione del livello di ibridazione e delle funzioni implementate come è possibile vedere nella tabella seguente e in figura 4.14.

Sistema ibrido	Tensione batterie	Start/Stop motore termico	Frenata rigenerativa	Trazione assistita da motore elettrico	Trazione completamente elettrica
Convenzionale		Possibile	Minima	No	No
Micro	14-42 V	Si	Minima	Minima	No
Mild (GM Silverado)	42 V	Si	Modesta	Modesta	No
Medium (Honda Insight, Civic)	144 V	Si	Si	Si	Modesta
Full (Toyota Prius, Ford Hybrid Escape)	>200 V —	Si	Si	Si	Si

Tabella 4.2 Classificazione veicoli ibridi in base al livello di ibridazione

Il livello più basso di ibridazione di un veicolo è rappresentato dai veicoli micro HEV (hybrid electric vehicle) che combinano la funzionalità di start e stop del motore termico a limitate capacità di frenatura a recupero d'energia. Per questi veicoli la capacità tipica del generatore è di 2-4 kW associata a batterie tradizionali da 12 V [5].

Per tensioni più elevate (42 V) è possibile assistere elettricamente il motore termico in fase di trazione, questa funzionalità è tipica dei veicoli mild HEV per le basse velocità.

Per velocità più elevate è necessaria maggiore potenza e una maggior capacità di immagazzinamento dell'energia, portando le tensioni nel range di 110-220 V, tipiche di veicoli medium HEV.

L'ultima classe è rappresentata dai veicoli completamente ibridi capaci di trazione completamente elettrica seppur per un periodo di tempo limitato, supportano inoltre completamente tutte le funzionalità ibride.

Il motore elettrico è dimensionato tipicamente tra i 30-50 kW mentre la tensione delle batterie varia tra i 200 V e i 500 V [4].

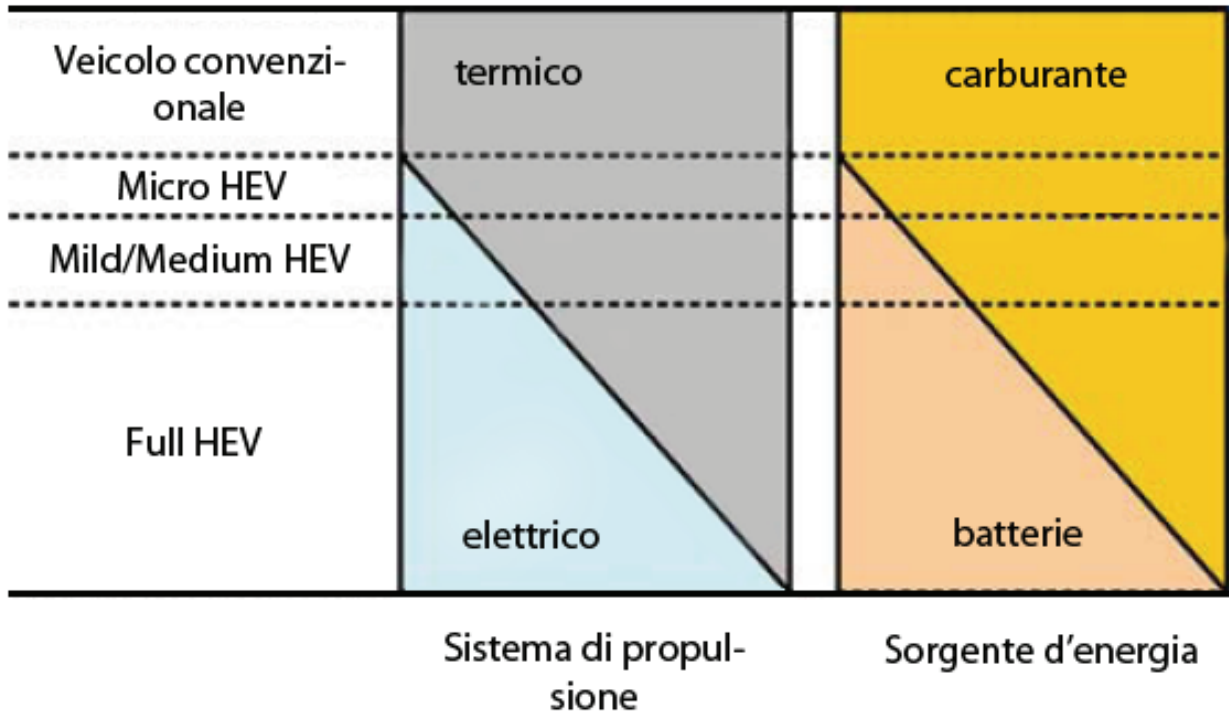


Figura 4.14 Schema di classificazione veicoli ibridi

Bibliografia

- [1] K.T.Chau, Y.S. Wong, “Overview of power management in hybrid electric vehicles”, *Energy Conversion and Management* 43 (2002) pag. 1953-1968, Elsevier Science Ltd.
- [2] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, John M. Miller, “Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives”, *Proceedings of the IEEE* Vol.95 N.4 Aprile 2007.
- [3] C.C.Chan, “The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles”, *Proceedings of the IEEE* Vol.95 N.4 Aprile 2007.
- [4] K.T.Chau, “Emerging energy-efficient technologies for hybrid electric vehicles”, *Proceedings of the IEEE* Vol.95 N.4 Aprile 2007.
- [5] Eckhard Karden, Servé Ploumen, Birger Fricke, Ted Miller, Kent Snyder, “Energy storage devices for future hybrid electric vehicles”, *Journal of Power Source* 168 (2007) pag. 2-11.
- [6] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi, “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles”, CRC Press 2005, ISBN 0849331544.
- [7] Allen E. Fush, “Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation”, CRC Press 2009, ISBN 9781420075342.
- [8] Ali Emadi, “Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives”, CRC Press 2005, ISBN 9780824723613.
- [9] Timothy E. Lipman, Mark A. Delucchi, “Hybrid-Electric Vehicle Design Retail and Lifecycle Cost Analysis”, UCD-ITS-RR-03-01, Analysis and Report Prepared for The Energy Foundation, Energy and Resources Group University of California, Berkeley Aprile 2003

5 Sistemi di accumulo in ambito automotive

Nei veicoli ibridi il sistema d'accumulo rappresenta l'elemento chiave per il funzionamento del veicolo stesso. La scelta del sistema di accumulo e il suo corretto dimensionamento sono di notevole importanza, andando a ripercuotersi direttamente sul funzionamento e sulle prestazioni del veicolo.

Esistono parecchie tipologie di sistema di accumulo utilizzabili in ambito automobilistico, le principali includono le batterie, i supercondensatori e i volani ad altissima velocità.

I requisiti che un sistema di accumulo deve garantire per questo genere di applicazioni sono vari e comprendono l'energia specifica, la potenza specifica, l'efficienza, l'affidabilità, i costi, lo smaltimento, la sicurezza e molti altri [1].

Per esempio, in veicoli completamente elettrici, l'energia specifica riveste un ruolo importante perché limita l'autonomia stessa del veicolo. D'altra parte, per un veicolo ibrido elettrico, l'energia specifica ha un ruolo secondario rispetto alla potenza specifica, in quanto il combustibile rappresenta già una fonte ad elevata energia specifica. Una elevata potenza specifica consente di garantire le performance del veicolo, in particolar modo durante le accelerazioni, i tratti in salita e la frenata a recupero.

~ 5.1 Accumulatori elettrochimici

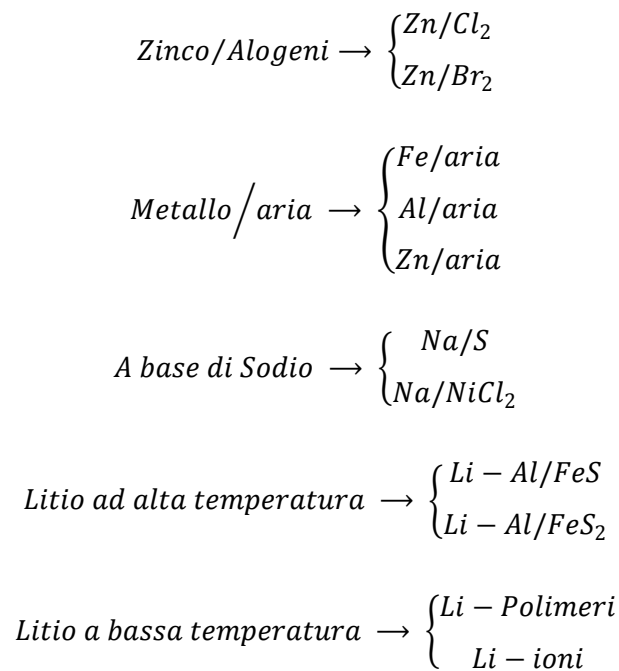
Gli accumulatori elettrochimici, più conosciuti come batterie, sono dispositivi elettrochimici che convertono energia elettrica in energia chimica durante la fase di carica, e convertono energia chimica in elettrica in fase di scarica.

Una batteria è generalmente costituita dall'unione in serie di più celle galvaniche al fine di elevare a valori tecnicamente più idonei la tensione disponibile ai morsetti del dispositivo stesso, in quanto la singola cella è caratterizzata da una differenza di potenziale nominale di circa 1-2 V.

Dalla prima batteria elettrica realizzata nel 1799 da Alessandro Volta, attualmente esistono in commercio svariate forme di accumulatori elettrochimici, i quali si differenziano principalmente per la tipologia di elettrodi e elettrolita utilizzati per la realizzazione. Tra le diverse tipologie esistenti sono di particolare interesse in ambito automobilistico [2]:

Piombo acido → VRLA

A base di Nichel → $\left\{ \begin{array}{l} Ni - Fe \\ Ni - Zn \\ Ni - Cd \\ Ni - MH \end{array} \right.$



In generale tutte le batterie, per motivi legati alla cinetica chimica, non possono operare a livelli di potenza elevati. In situazioni di rapida scarica o carica, infatti, i fenomeni dissipativi interni legati alla struttura chimica dell'accumulatore porta a un riscaldamento eccessivo che ne determina una rapida riduzione della vita del dispositivo stesso. Un altro limite all'impiego di questi accumulatori è legato all'utilizzo di sostanze inquinanti per la loro realizzazione e di gas tossici che vengono sprigionati durante i cicli di carica o scarica.

~ 5.1.1 Tecnologie utilizzate nelle batterie

Le batterie al piombo hanno avuto per oltre un secolo un enorme successo commerciale e continuano ad essere ampiamente usate come sistema di accumulo in ambito automotive e in altre applicazioni.

I vantaggi sono rappresentati dal basso costo, dalla tecnologia ormai matura e dall'alta potenza specifica (>200 W/kg). L'elevata potenza specifica, le rende appetibili per l'applicazione nei veicoli ibridi.

Tra gli svantaggi, da notare la bassa densità d'energia rispetto a tecnologie concorrenti, la presenza di composti chimici altamente pericolosi come l'acido solforico e i ridotti cicli di ricarica.

Per porre rimedio a questi difetti, negli ultimi anni sono stati sviluppate dei nuove soluzioni che però presentano costi molto più elevati.

Le batterie a base di nichel sono una tecnologia che negli ultimi tempi è diventata matura per l'applicazione pratica in ambito automobilistico. Tra le varie tipologie, le più importanti sono: Ni-Fe, Ni-Zn, Ni-Cd e Ni-Mh.

Le batterie Ni-Fe e Ni-Zn sono poco appetibili, le prime sono caratterizzate da una bassa potenza specifica (25-110 W/kg) mentre le seconde hanno un ciclo di vita molto ridotto (100-300 cicli).

D'altra parte le batterie Ni-Cd e Ni-MH hanno ottime prospettive di utilizzo nei veicoli elettrici e nei veicoli ibridi.

Le batterie Ni-Cd rappresentano la tecnologia più matura, caratterizzata da alte potenza specifiche (150-350 W/kg), un ciclo di vita molto elevato (800-2000 cicli) e capacità di ricarica rapida. Di contro, hanno bassa energia specifica (45 Wh/kg) e soprattutto un'elevata tossicità e pericolosità ambientale a causa della presenza del cadmio.

Le batterie Ni-MH sono considerate le più promettenti, nel breve periodo, per una adozione nei veicoli ibridi [2], offrono infatti la più alta densità di energia tra le batterie al nichel, una elevata potenza specifica (150-300 W/kg), una durata di vita molto elevata (800-2000 cicli) e ridotto impatto ambientale.

Il principale difetto è rappresentato dall'elevato costo iniziale, circa il doppio delle batterie Ni-Cd.

Le batterie zinco/alogeni sono soggette a sviluppo a fasi alterne dagli anni 70, sia per applicazioni automotive che per applicazioni stazionarie. Sono caratterizzate da elevate energie specifiche (70 Wh/kg), basso costo dei materiali e basse potenze specifiche.

Grazie all'inesauribilità dell'aria, lo sviluppo delle batterie metallo/aria hanno ricevuto una notevole spinta. Sebbene le batterie Al/aria offrano elevate energie specifiche (190 Wh/kg), la loro eccezionalmente bassa densità di potenza (16 W/kg) le rende inadatte all'uso e il loro sviluppo è stato abbandonato.

Notevole attenzione invece riscuotono le batterie Zn/aria, possono essere ricaricate sia elettricamente che attraverso la rigenerazione (aggiungendo zinco), presentano un'alta energia specifica (105 W/kg) e un basso costo dei materiali.

A fare da contraltare la bassa densità di potenza e l'incapacità di poter accumulare l'energia proveniente dalle frenate a recupero.

Le batterie Na/S presentano ancora notevoli problemi come l'elevata corrosività dei prodotti di reazione e la difficile gestione termica del dispositivo che deve lavorare a temperature prossime ai 300/350 °C. Tali difetti si possono difficilmente conciliare con l'esigenza di un veicolo stradale.

A differenza delle batterie sopracitate, le batterie Na/NiCl₂ presentano gli stessi vantaggi uniti ad un range di temperature di funzionamento più ampio e una sicurezza maggiore soprattutto in caso di guasti.

Nell'ambito dell'alta temperatura si inseriscono le batterie al litio Li-Al/FeS e Li-Al/FeS₂ che presentano temperature di funzionamento comprese tra i 375 e i 500 °C.

I vantaggi di questa tecnologia influiscono soprattutto sull'elevata energia e potenza specifica (130-180 Wh/Kg e 240-400 W/kg), mentre gli svantaggi sono rappresentati dall'alta temperatura e dal consumo d'energia necessaria per mantenerla.

A basse temperature troviamo le batterie agli ioni di litio e litio-polimeri che rappresentano la scelta del futuro in ambito automobilistico, offrendo sia una energia che una potenza specifica elevata. Nel caso delle batterie litio-polimeri, esse soffrono ancora di una durata di vita assai breve (600 cicli) rispetto agli ioni di litio (1200 cicli), mentre quest'ultime presentano un prezzo iniziale molto elevato. Ad ogni modo recentemente si è assistito ai primi timidi tentativi di applicazione.

Tecnologia	Energia specifica [Wh/kg]	Densità d'energia [Wh/l]	Potenza specifica [W/kg]	Ciclo di vita (n° cicli)	Costo [\$/kWh]
VRLA	30-50	60-100	200-400	400-600	120-150
Ni-Fe	30-55	60-110	25-110	1200-4000	-
Ni-Zn	60-65	120-130	150-300	100-300	-
Ni-Cd	40-50	80-100	150-350	800-2000	300-350
Ni-MH	50-70	100-140	150-300	800-2000	150-200
Zn/Cl ₂	65	90	60	200	-
Zn/Br ₂	65-75	60-70	90-110	300	150
Fe/aria	75	100	60	300-600	-
Al/aria	190	190	16	ricarica meccanica	-
Zn/aria	230	269	105	ricarica meccanica	100
Na/S	100	150	120	800	250-500
Na/NiCl ₂	86	149	150	1000	160-300
Li-Al/FeS	130	220	240	1000	-
Li-Al/FeS ₂	180	350	400	1000	-
Li-polimeri	155	220	315	600	125
Li-ioni	120-140	240-280	200-300	1200	150-180
USABC ^a	200	300	400	1000	100

^a Obiettivo USABC (United States Advanced Battery Consortium) per il futuro

Tabella 5.1 Schema riassuntivo delle principali caratteristiche delle batterie

~ 5.2 Supercondensatori

A causa delle frequenti operazioni di stop-and-go che caratterizzano i veicoli elettrici e ibridi, il profilo di carica e scarica del sistema di accumulo è molto vario. La potenza media richiesta è molto più bassa rispetto al picco di potenza richiesta per l'accelerazione durante periodi relativamente brevi. In un veicolo ibrido la potenza di picco che il sistema di accumulo è in grado di fornire è molto più importante rispetto dell'energia specifica.

Le attuali batterie non sono in grado di fornire la potenza specifica necessaria unita ad una elevata energia specifica, quindi non possono svolgere le funzioni di una sorgente di potenza.

Per queste ragioni grande attenzione è stata rivolta verso i supercondensatori.

Questi dispositivi sono così denominati in quanto, a differenza dei condensatori tradizionali, sono caratterizzati da densità di energia nettamente superiori.

L'energia accumulata in un condensatore è data dalla seguente relazione:

$$W = \frac{1}{2} CV^2$$

Dove W è l'energia accumulata espressa in [J], C la capacità nominale del dispositivo espressa in [F] e V la tensione ai capi del condensatore espressa in [V].

Un condensatore tradizionale è caratterizzato da due armature metalliche separate da un dielettrico; applicando una differenza di potenziale tra le due armature si ha un accumulo di cariche di segno opposto sulle armature stesse, creandosi così un campo elettrico. L'energia associata al campo elettrico rappresenta l'energia immagazzinata.

In un condensatore di questo tipo il valore di capacità C è dell'ordine dei μF , mentre la tensione è limitata dalla rigidità del dielettrico contenuto tra le armature. Questo fa sì che la densità di energia sia molto bassa, mentre lo stesso non si può dire per la densità di potenza che è dell'ordine dei 10^6 W/kg . La limitata densità di energia non permetteva l'utilizzo di tale dispositivo come accumulatore nelle applicazioni di potenza.

I supercondensatori, invece, grazie alla diversa tecnologia costruttiva, sono caratterizzati da densità di energia molto maggiori rispetto a quelli tradizionali in quanto la capacità C sono dell'ordine delle migliaia di Farad, anche se la tensione nominale è limitata ai 2-3 V. Come si può notare in figura 5.1 questi dispositivi sono costituiti da due elettrodi porosi immersi in una soluzione elettrolitica.

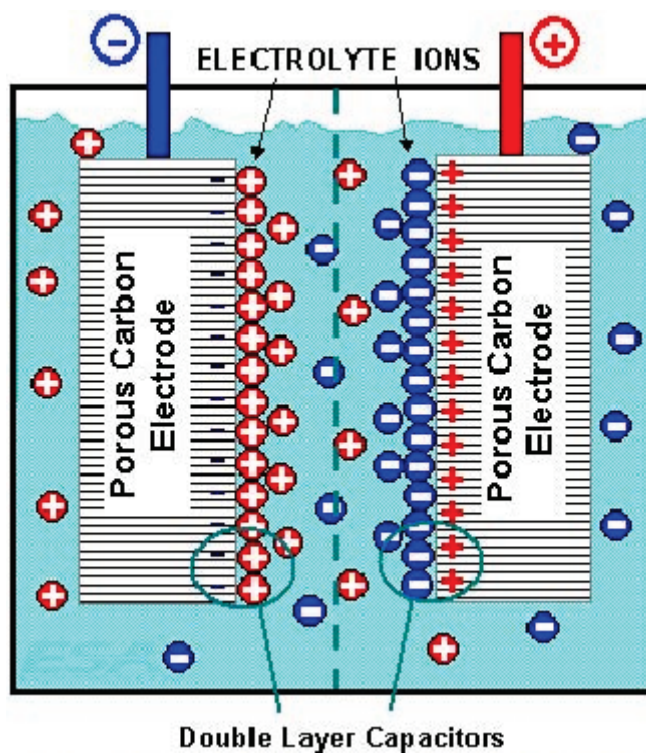


Figura 5.1 Schema di principio di un supercondensatore caratterizzato da due elettrodi porosi

Gli elettrodi sono realizzati con materiali porosi, come il carbone, al fine di incrementare la superficie di contatto disponibile con l'elettrolita, che può essere sia acquoso che organico. I condensatori con elettrolita acquoso presentano valori di densità di energia minori e questo è dovuto alla minore tensione di cella a cui possono essere sottoposti. Nonostante questo risultano più economici e operativi in un range di temperatura più ampio.

Comparati alle tradizionali batterie al piombo, i supercondensatori presentano valori di densità di energia minori (3,5-4,5 Wh/kg), ma densità di potenza nettamente superiori (800-1200 W/kg) [3] e sopportano un numero di cicli di carica e scarica nettamente superiori.

Tali dispositivi trovano impiego in numerose applicazioni, dal settore trasporti alla power quality nelle reti elettriche, dal settore automotive alle turbine eoliche..., in generale in tutte quelle applicazioni in cui si richiedono elevati valori di potenza ma non di energia.

~ 5.3 Volani ad altissima velocità

I volani sono dei dispositivi elettromeccanici in grado di accumulare energia. Essi, infatti, sfruttano l'energia cinetica posseduta da una massa posta in rotazione attorno ad un asse verticale. Affinché l'energia accumulata possa essere immessa nella rete elettrica questi dispositivi sono accoppiati a una macchina elettrica funzionante da motore e generatore. In particolare la macchina elettrica funge da motore nelle fasi di ricarica del volano che viene portato a funzionare a un numero di giri di rotazione pari a quelli nominali, mentre nelle fasi di scarica il macchinario elettrico funge da generatore e il regime di rotazione del volano decresce. Nella maggior parte delle applicazioni viene utilizzato anche un convertitore di potenza per regolare la macchina elettrica e provvedere a un funzionamento in un range operativo più ampio.

L'energia immagazzinata è data dalla seguente relazione:

$$W = \frac{1}{2}J\omega^2,$$

dove W è l'energia accumulata espressa in [J], J il momento di inerzia della massa rotante espressa in [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] e ω velocità angolare espressa in [rad/s].

La capacità di accumulo può essere incrementata aumentando il momento di inerzia, il regime di rotazione o entrambi.

L'uso di volani per l'accumulo di energia in forma meccanica non è un'idea recente. Al contrario l'impiego di volani in materiale composito, dal peso massimo di una decina di kg e la possibilità di raggiungere regimi di rotazioni di migliaia di radianti al secondo rappresentano dei progressi raggiunti solo recentemente.

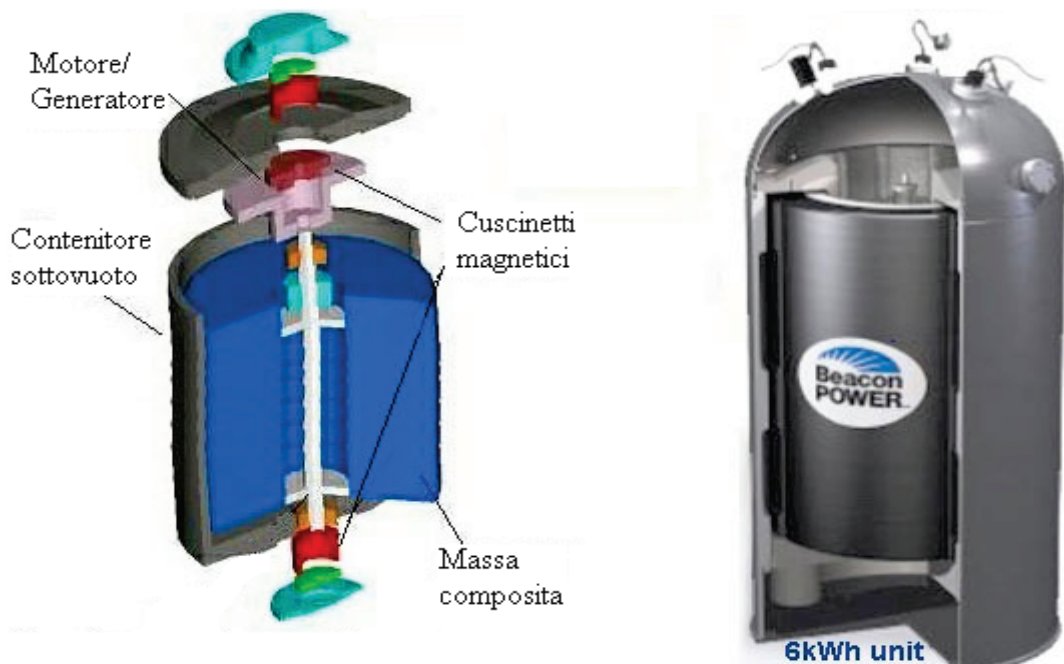


Figura 5.2 Schema di un volano da 6 kWh prodotto dalla Beacon Power

Come si può vedere dalla figura 5.2, grande attenzione viene riposta nella minimizzazione degli attriti utilizzando cuscinetti magnetici e racchiudendo il volano in un ambiente sottovuoto.

I vantaggi dell'utilizzo dei volani risiedono nella bassa manutenzione necessaria, la lunga vita operativa (20 anni) e l'utilizzo di materiali inerti.

I vantaggi e i progressi tecnologici hanno consentito di utilizzare i volani, seppur sperimentalmente, in ambito automobilistico come sorgente di potenza, sfruttando l'elevata potenza specifica (800-900 W/kg) di questa soluzione.

~ 5.4 Raffronto tra le diverse forme di accumulo

L'abilità di accumulare e fornire elevati livelli di potenza, come già accennato in precedenza, è essenziale per il corretto funzionamento di un sistema di propulsione ibrido. Il veicolo ibrido deve, infatti, le proprie funzionalità operative al suo sistema di accumulo.

Le tipologie di accumulo si differenziano per caratteristiche tecniche, pesi, costi e trovano ambiti di applicazione differenti.

Le batterie, in generale, sono progettate per fornire alte energie specifiche a discapito delle potenze, all'estremo opposto troviamo i supercondensatori che presentano invece potenza specifiche elevatissime a discapito dell'energia specifica. Tra queste due categorie si inseriscono i volani che presentano caratteristiche intermedie con buoni livelli di energia e potenza specifica, come è possibile vedere in figura 5.3.

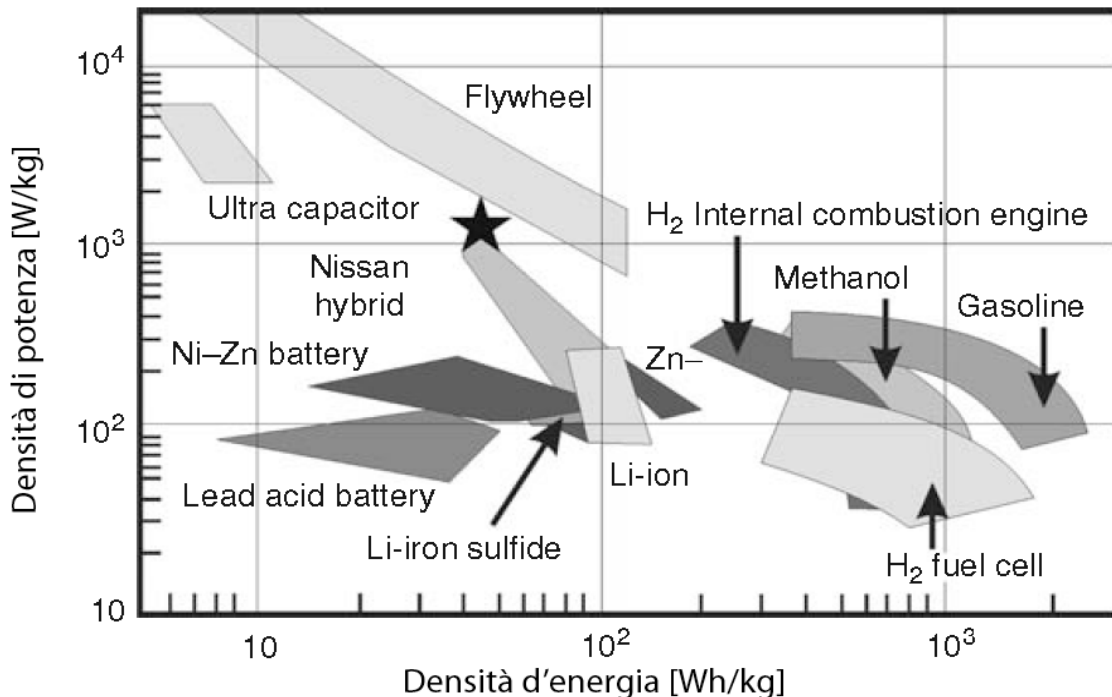


Figura 5.3 Potenza specifica e energia specifica (mostrate sotto forma di densità) di vari sistemi di accumulo e conversione d'energia

Valutando le caratteristiche dei diversi sistemi d'accumulo in un'ottica automobilistica, le caratteristiche dei supercondensatori li rendono ottimi come sorgente di potenza, capaci di fornire e assorbire energia in tempi brevissimi, rendendoli utili per una applicazione nei veicoli ibridi elettrici.

Il tallone d'Achille di questa tecnologia è rappresentato dalla bassissima energia specifica che li rende pressoché incapaci di erogare energia per tempi sufficientemente lunghi e in grado di garantire un funzionamento puramente elettrico di un veicolo ibrido. Ultimamente si è avanzata la possibilità di un ibridazione dei sistemi di accumulo, ossia di utilizzare in combinazione due sistemi di accumulo differenti. In particolare batterie e supercondensatori, prendendo il meglio dei due mondi, l'elevata energia specifica delle batterie per sopperire a domande di energia prolungata e l'elevata potenza specifica dei supercondensatori per coprire i transitori, ottenendo come effetto un allungamento dei cicli di vita della batteria [4].

Un aspetto molto importante da tenere in considerazione, in ambito automotive, è rappresentato dal peso e dagli ingombri del sistema di accumulo, risultando determinanti in fase di progettazione.

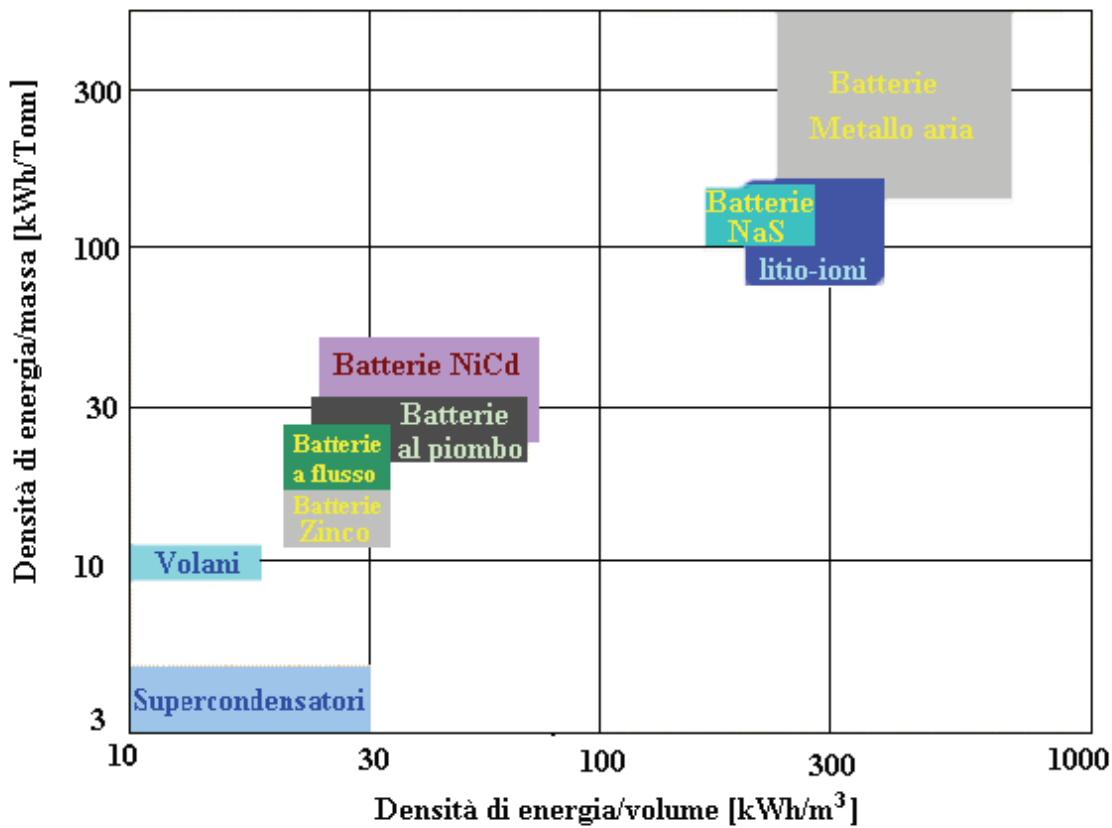


Figura 5.4 Densità di energia/massa & densità di energia/volume per i diversi dispositivi di accumulo.

Si nota come uno stesso dispositivo sia definito in intervalli estesi di densità di energia per unità di volume e di massa; questo, in funzione della tipologia di fabbricazione e della struttura dell'involucro contenente il dispositivo stesso, e riflette le differenze esistenti tra i diversi modelli di accumulatori appartenenti ad una stessa famiglia.

Si procede ora ad effettuare un confronto economico tra le diverse tecnologie. Si analizza dapprima il costo capitale dei diversi dispositivi, ossia il puro costo che presenta un certo dispositivo con determinate caratteristiche tecniche, e successivamente si analizza il costo che questi stessi accumulatori presentano se rapportati alla loro vita utile (intesa come numero di cicli di carica e scarica) e alla loro efficienza (intesa come rapporto tra l'energia realmente erogata e quella totale accumulata). Questa distinzione vuole evidenziare come il costo di un accumulatore è strettamente legato alla tipologia di impiego e al ciclo di lavoro a cui sarà sottoposto. In figura 5.5 [5] sono indicati i costi capitali per unità di potenza e di energia dei diversi dispositivi in esame. Si evidenzia che i dati riportati, riferiti al 2002, hanno lo scopo di fornire una guida e non sono da intendersi come una base dettagliata di riferimento.

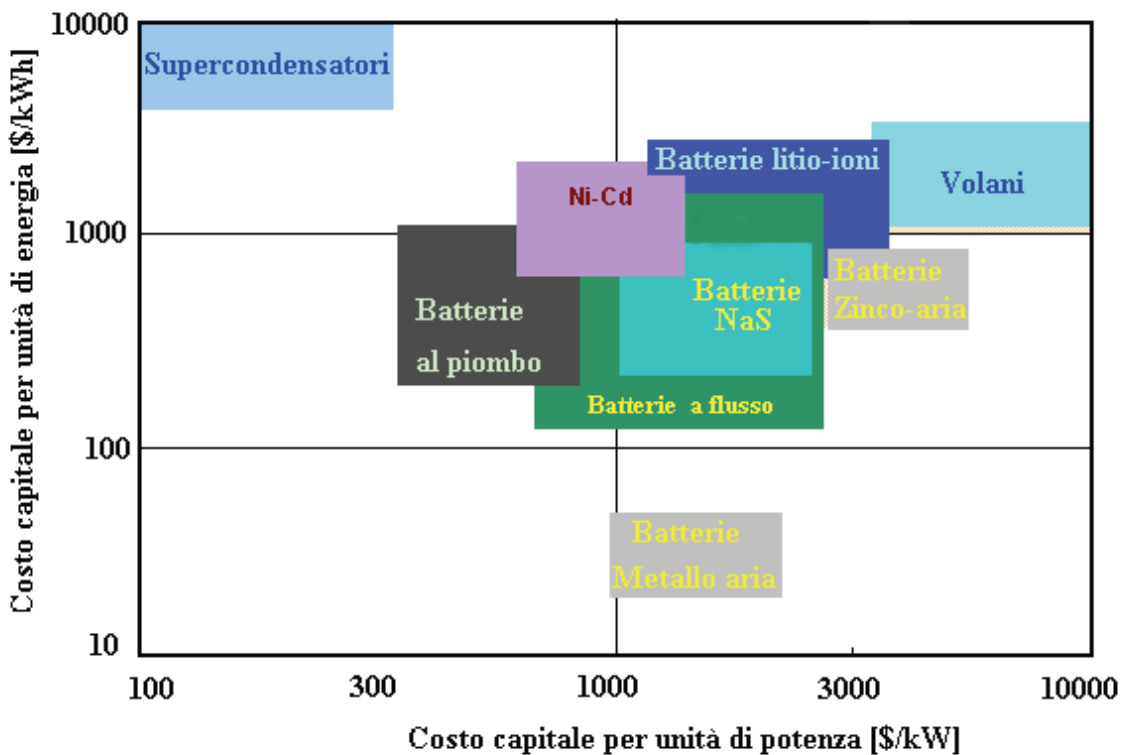


Figura 5.5 Costo capitale per unità di energia & costo capitale per unità di potenza.

Il costo capitale per unità di energia indicato è riferito all'energia erogabile dal dispositivo in esame, quindi calcolato come rapporto tra il costo capitale per unità di energia immagazzinata e l'efficienza del dispositivo stesso. E' interessante notare come le caratteristiche dei dispositivi viste in precedenza e il loro ambito di utilizzo, influiscano sui costi stessi del dispositivo.

Si analizza ora in figura 5.6 l'efficienza energetica rapportata al numero di cicli di utilizzo. L'unione dei dati relativi a questa figura e a quella precedente permette di ricavare i costi capitali per ciclo.

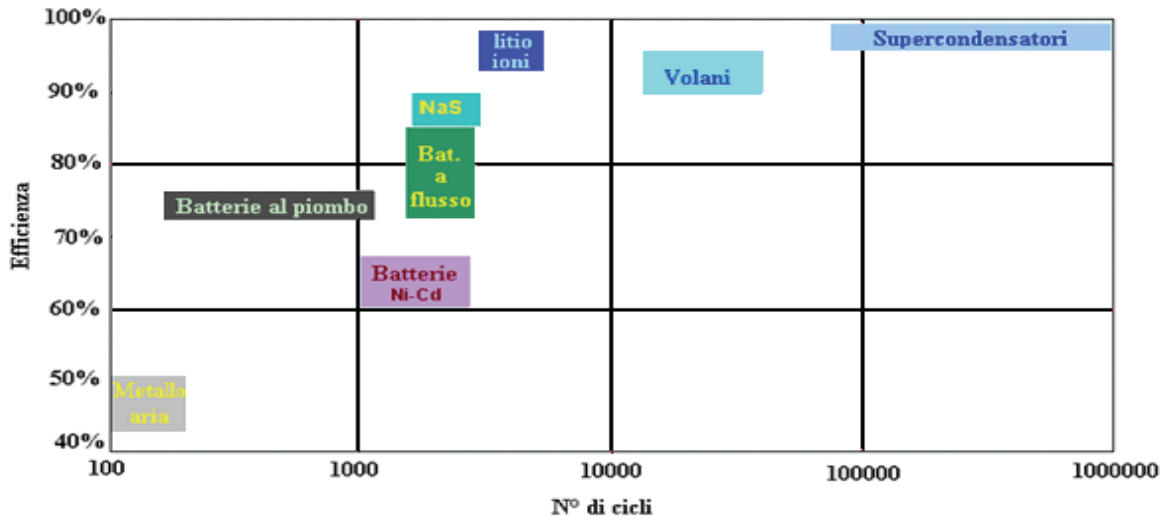


Figura 5.6 Efficienza & N° di cicli di carica/scarica dei diversi accumulatori

L'efficienza indicata in figura 5.6 è intesa come rapporto tra energia accumulata ed energia liberata in fase di scarica. Mettendo in luce un primo risultato interessante, si nota come le batterie metallo-aria mostrano caratteristiche eccellenti, ma siano al contempo caratterizzate da un bassissimo numero di cicli ed efficienza. Questo spiega come, nonostante il loro costo capitale non sia molto diverso rispetto alle altre forme di accumulo, il costo capitale per ciclo sia il più alto di tutti. Il costo capitale per ciclo è calcolato come il rapporto tra il costo capitale per unità di energia erogata e il prodotto tra efficienza e N° di cicli di utilizzo:

$$\text{Costo capitale per ciclo} = \frac{\text{costo capitale per unità di energia erogata}}{\text{efficienza} * \text{n° cicli di utilizzo}}$$

Questo indice è idoneo per la valutazione del costo dell'accumulo in tutte quelle applicazioni caratterizzate da frequenti cicli di carica/scarica, dato che fornisce un'indicazione di massima sul costo di un singolo ciclo.

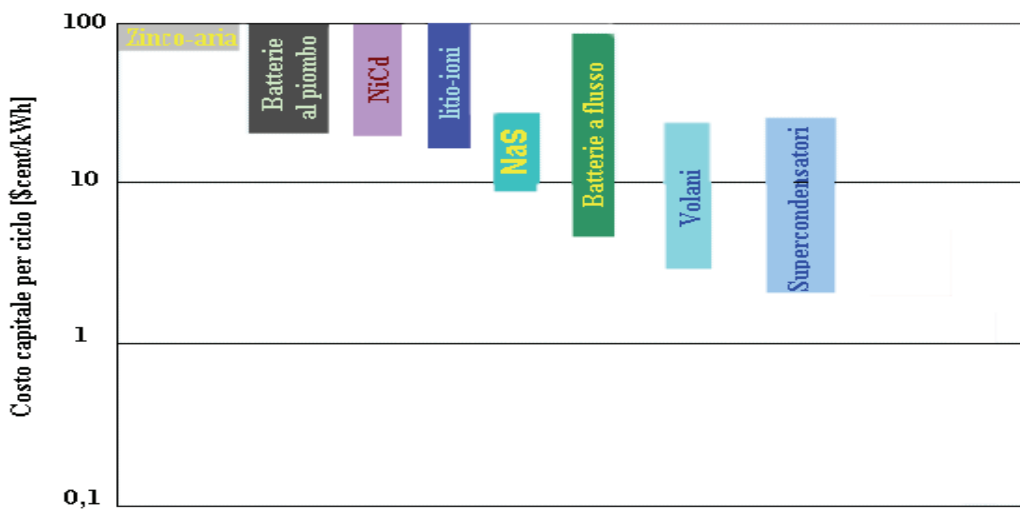


Figura 5.7 Costo capitale per ciclo di utilizzo delle diverse forme di accumulo

Questa prima analisi qualitativa condotta vuole solo evidenziare alcune delle caratteristiche delle diverse tecnologie di accumulo e come non esista una tecnologia che prevalga sulle altre. Quello che si può concludere è come siano molteplici i parametri che si possono andare a prendere in considerazione per analizzare una forma di accumulo rispetto ad un'altra e come la scelta sia strettamente legata al campo d'impiego della forma di accumulo stessa. Oltre a questo bisogna soffermarsi sul fatto che le analisi da condurre per valutare il reale costo di una forma di accumulo rispetto ad un'altra è di notevole complessità ed esula da questo lavoro. Nel prosieguo dell'attività ci si sofferma ad analizzare, in particolare, le caratteristiche dei supercondensatori e il loro impiego a bordo di veicoli ibridi.

Bibliografia

- [1] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi, “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles” 2nd edition, CRC Press 2010, ISBN 9781420053982.
- [2] K.T. Chau, Y.S. Wong, C.C. Chan, “An overview of energy sources for electric vehicles”, Energy Conversion & Management 40 (1999) pag. 1021-1039, Elsevier Science Ltd.
- [3] Andrew F. Burke, “Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles”, Proceedings of the IEEE Vol. 95,N.4 Aprile 2007.
- [4] Ali Emadi, “Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives”, CRC Press 2005, ISBN 9780824723613.
- [5] Roberto Ferrabue, Vincenzo Musolino, “Supercondensatori: nuovo modello e prestazioni”, Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Milano Dipartimento di Elettrotecnica, Anno accademico 2006/2007.
- [6] M.Broussely, G.Pistoia, “Industrial Applications of Batteries: From Cars to Aerospace and Energy Storage”, Elsevier 2007, ISBN 9780444521606.
- [7] Sandeep Dhameja, “Electric Vehicle Battery System”, Newnes 2002, ISBN 0750699167
- [8] Allen E. Fush, “Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation”, CRC Press 2009, ISBN 9781420075342.

6 Modellizzazione di un veicolo ibrido serie

Le simulazioni basate sulle performance del veicolo sono fondamentali per lo sviluppo di un sistema di trazione ibrido, dato che la progettazione e la validazione mediante l'utilizzo di prototipi è impraticabile dal punto di vista economico. L'utilizzo di sistemi di modellazione integrati risulta quindi più che mai necessario per velocizzare la fase progettuale e migliorarne l'accuratezza.

La scelta di modellare un veicolo ibrido serie è legata alla semplicità strutturale di questa topologia che si riflette anche nel sistema di controllo, nondimeno le possibili soluzioni possono essere applicate mediante accorgimenti alle altre tipologie di veicolo ibrido.

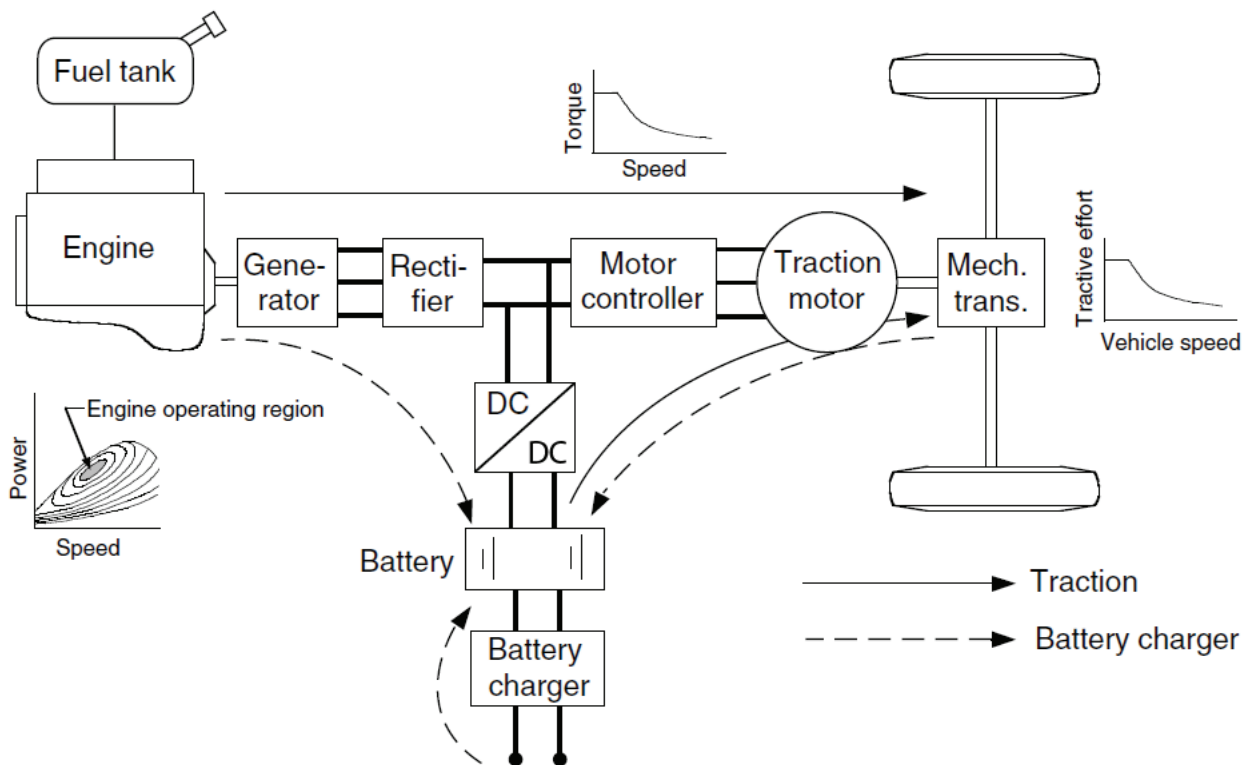


Figura 6.1 Veicolo ibrido serie

L'intero veicolo e i suoi vari componenti vengono modellizzati utilizzando essenzialmente modelli di natura statica che consentono di valutare egregiamente il comportamento del veicolo dal punto di vista energetico, permettendo l'ottimizzazione del sistema di accumulo.

~ 6.1 Dinamica longitudinale del veicolo

Per modellizzare il comportamento e la dinamica del veicolo, senza commettere errori rilevanti, è possibile considerare in prima approssimazione la dinamica longitudinale a discapito della dinamica laterale e verticale del veicolo. Considerando la massa del veicolo concentrata nel suo baricentro come è possibile vedere in figura 6.2[1].

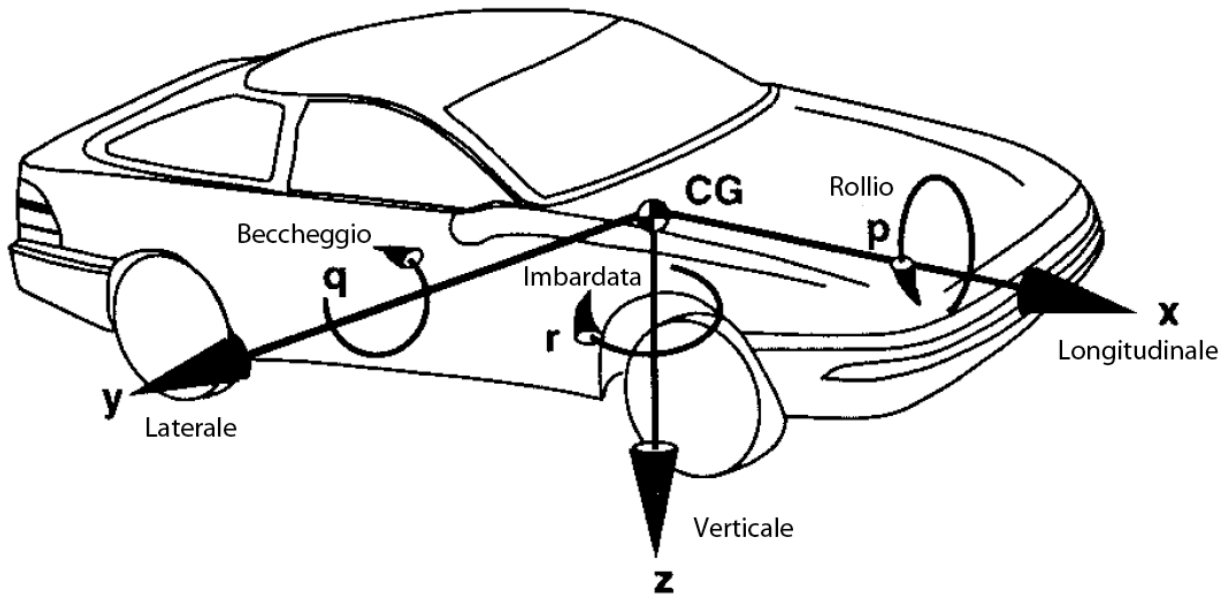


Figura 6.2 Sistema di coordinate di un veicolo

L'energia prodotta dal sistema di trazione viene immagazzinata nel veicolo e nelle sue masse rotanti, sotto forma di energia cinetica durante l'accelerazione e sotto forma di energia potenziale quando il veicolo raggiunge altitudini maggiori.

Parte di questa energia viene poi “drenata” da questa riserva per compensare le perdite dovute essenzialmente a tre fattori: le perdite per attrito aerodinamico, le perdite per attrito volvente e le perdite dovute alla dissipazione d'energia in frenata.

L'equazione elementare che descrive la dinamica longitudinale di un veicolo stradale è la seguente:

$$m_v \frac{d}{dt} v(t) = F_t(t) - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) + F_d(t))$$

Dove F_a rappresenta l'attrito aerodinamico, F_r rappresenta l'attrito volvente, F_g la forza legata alla gravità in strade non orizzontali e F_d una forza di disturbo che tiene conto di tutti gli effetti minori non specificati, come le forze d'attrito interne [2].

La forza F_t rappresenta la forza di trazione generata dal motore primo meno la forza necessaria per accelerare le parti rotanti all'interno del veicolo e meno le perdite legate all'attrito.

Una rappresentazione schematica di queste relazioni è presente nella figura successiva.

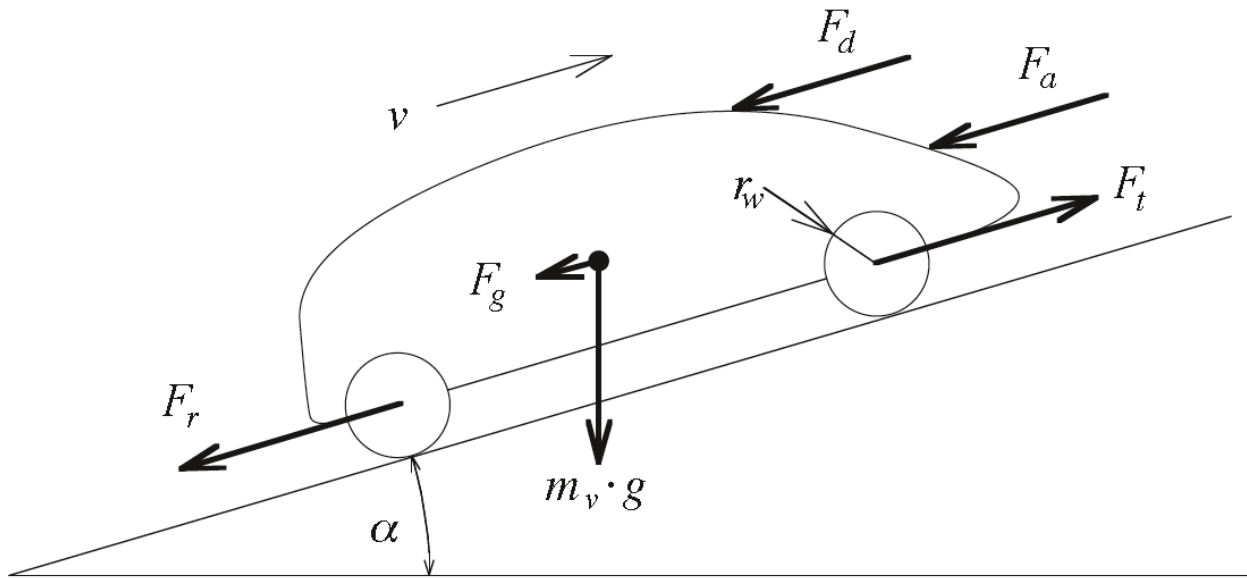


Figura 6.3 Rappresentazione schematica delle forze agenti su di un veicolo

~ 6.1.1 Forza d'attrito aerodinamico

La forza d'attrito aerodinamico agente su un veicolo in movimento è dovuta in parte all'attrito viscoso dell'aria circostante sulla superficie del veicolo e in parte alla differenza di pressione presente tra la parte frontale del veicolo e la parte posteriore, generata dalla separazione dei flussi d'aria.

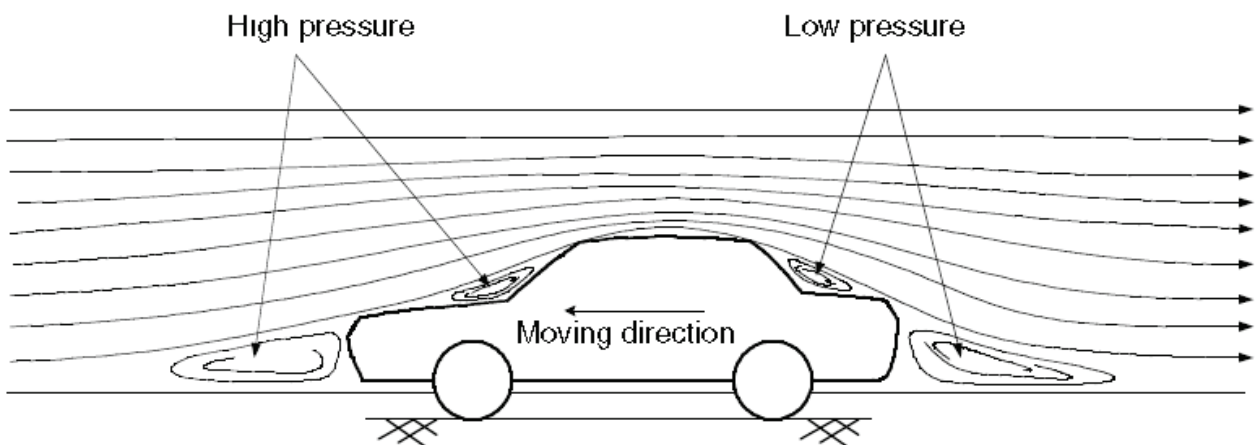


Figura 6.4 Tipico andamento dei flussi d'aria

Se il primo contributo del fenomeno è modellizzabile facilmente con l'equazione di Bernoulli [1], lo stesso non si può dire della componente legata alla pressione. Per forme idealizzate di veicolo, il calcolo approssimato della pressione e della forza risultante è fattibile con l'aiuto di metodi numerici. Per strutture

più dettagliate e per una analisi di effetti particolari come la ventilazione del motore e le turbolenze, risulta necessario ricorrere a specifiche misure in galleria del vento.

Per una tipica vettura passeggeri, il corpo macchina è responsabile approssimativamente del 65 % della resistenza aerodinamica, la restante parte va suddivisa per un 20 % alle ruote, per un 10 % a specchietti laterali, tergicristalli, finestrini e antenne varie e il restante 5 % è dovuto alla ventilazione del motore.

A causa della complessità del fenomeno è necessario sviluppare un metodo semi-empirico per rappresentarne gli effetti, approssimando la forza d'attrito aerodinamico e assumendo che la forma del veicolo sia riconducibile a un solido prismatico con area frontale A_f .

La forza d'attrito causata dalla stagnazione della pressione è moltiplicata per un coefficiente di resistenza aerodinamica C_d che modella le condizioni di flusso:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a A_f C_d (v) v^2$$

Dove v rappresenta la velocità del veicolo, ρ_a la densità dell'aria, mentre il parametro C_d può essere stimato mediante simulazione numerica o misura in galleria del vento [3].

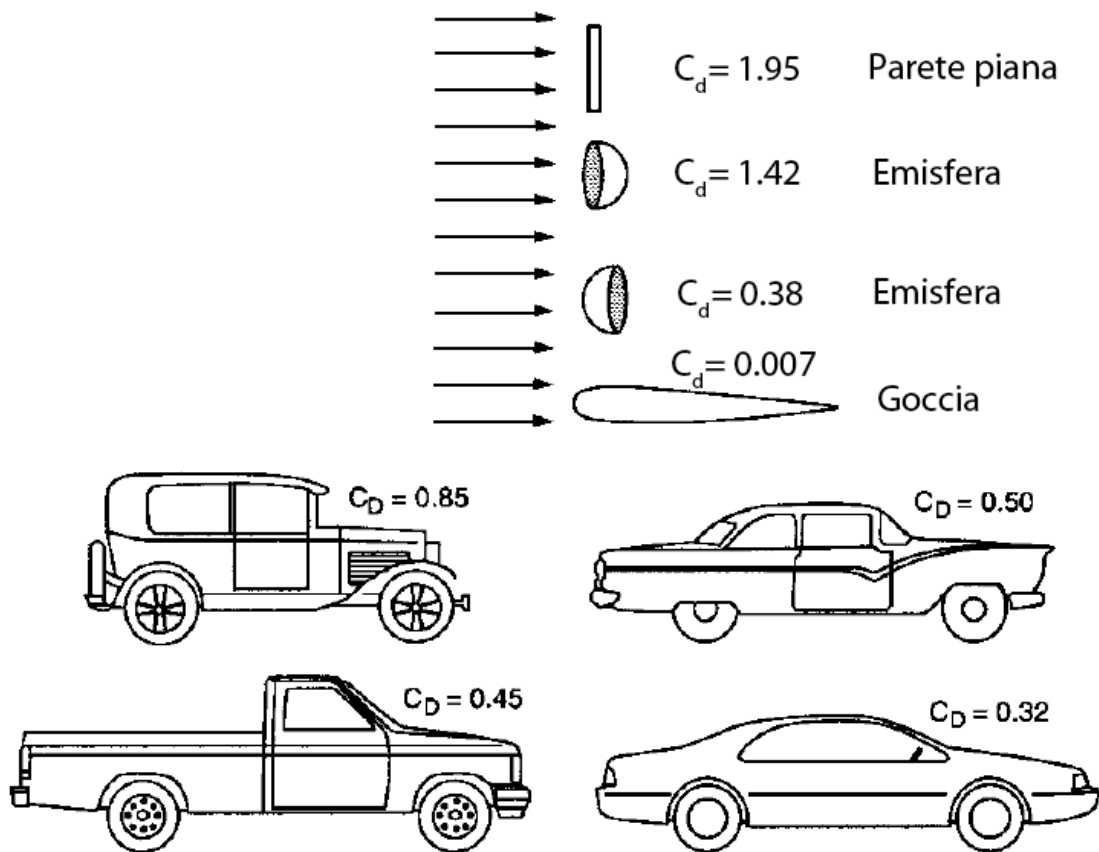


Figura 6.5 Coefficiente di resistenza aerodinamica per vari veicoli e forme

Tale parametro è funzione della velocità ma per una stima dell'energia meccanica richiesta dal veicolo in un tipico ciclo di guida può essere considerata tranquillamente costante.

~ 6.1.2 Forza d'attrito volvente

La principale forza d'attrito a livello del suolo è rappresentata dall'attrito volvente dei pneumatici, a basse velocità essa rappresenta la forza d'attrito primaria nel moto di un veicolo. La resistenza aerodinamica infatti equivale la resistenza per attrito volvente solo a velocità prossime agli 80-90 km/h [1].

Mentre altri attriti agiscono solo sotto certe condizioni di moto, l'attrito volvente è presente dall'istante in cui le ruote iniziano a muoversi. L'attrito volvente inoltre ha l'effetto indesiderabile, la maggior parte della potenza spesa per il movimento delle ruote si trasforma in calore all'interno del pneumatico.

Questo aumento di temperatura è causa di una diminuzione della resistenza all'abrasione dei pneumatici e alla loro deformazione.

Per calcoli teorici corretti è necessario tenere conto della dinamica dei pesi del veicolo includendo gli effetti dell'accelerazione e le componenti laterali e verticali della forza in gioco.

Per una stima delle performance di un veicolo, la variazione dinamica del peso complica i calcoli senza offrire miglioramenti significativi nella precisione del calcolo. Per queste ragioni il peso statico del veicolo è sufficientemente accurato per valutare l'attrito volvente nella maggioranza delle situazioni.

La forza d'attrito volvente è spesso modellata come:

$$F_r(v, p, \dots) = C_r(v, p, \dots) m_v g \cos(\alpha), v > 0$$

Dove m_v rappresenta la massa del veicolo, g l'accelerazione gravitazionale e il termine $\cos(\alpha)$ modella l'influenza di una strada non orizzontale, anche se le situazioni nelle quali l'angolo ha una sostanziale influenza sono molto rare.

Il coefficiente d'attrito dipende da molte variabili, le più importanti sono senz'altro la velocità del veicolo, la pressione dei pneumatici e le condizioni del manto stradale, alle quali si aggiungono la temperatura, il materiale e la struttura dei pneumatici.

L'influenza della pressione è approssimativamente proporzionale a $1/\sqrt{p}$ [2] e solitamente tale effetto viene rappresentato attraverso equazioni di tipo parametrico.

Le condizioni della strada hanno senza dubbio l'impatto maggiore, una strada umida può incrementare il valore del coefficiente d'attrito del 20% e in condizioni estreme, come sulla sabbia, tale valore può facilmente raddoppiare.

Condizioni strada	Coefficiente d'attrito
Pneumatico di macchina su cemento o asfalto	0,013
Pneumatico di macchina su ghiaia	0,02
Tarmac	0,025
Strada non pavimentata	0,05
Campo	0,1-0,35
Pneumatici per camion su cemento o asfalto	0,006-0,01
Ruote su rotaie	0.001-0.002

Tabella 6.1 Coefficienti d'attrito volvente

La velocità del veicolo ha una piccola influenza per valori moderati, ma che cresce sostanzialmente quando ci si avvicina alla velocità critica, alla quale si innescano fenomeni di risonanza.

Un tipico esempio di queste relazioni è mostrato in figura 6.6, considerando che i pneumatici raggiungono l'equilibrio termico solo dopo un periodo di tempo relativamente lungo.

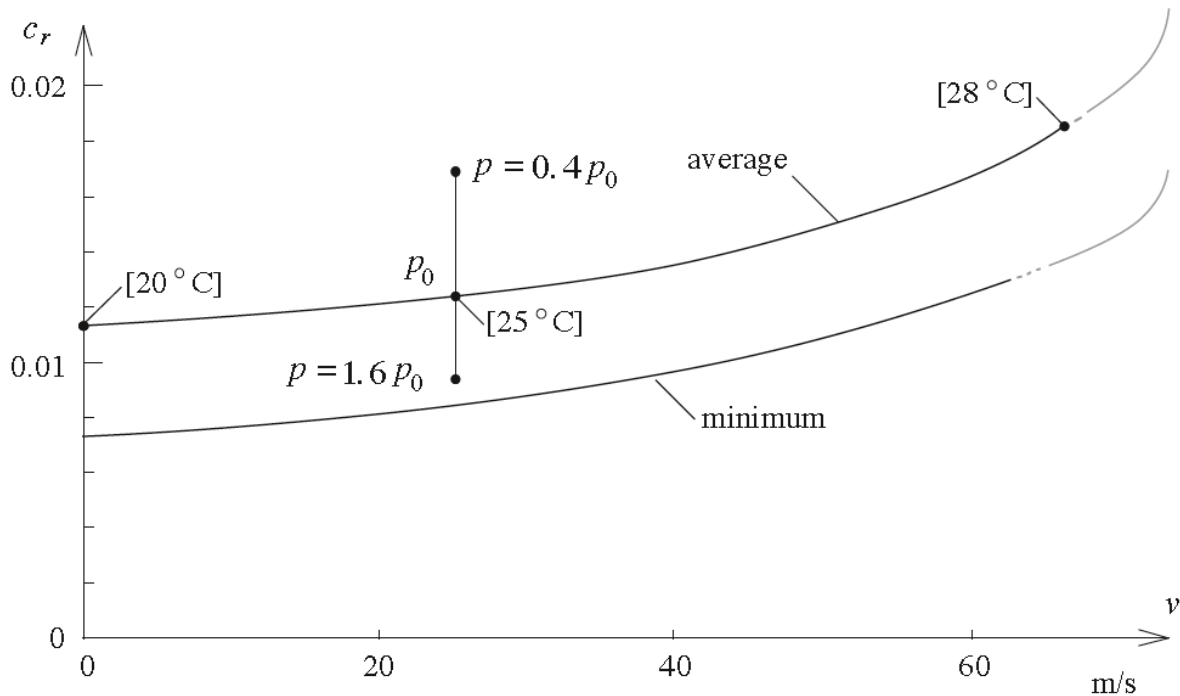


Figura 6.6 Coefficiente d'attrito volvente in funzione di velocità e pressione dei pneumatici

Per molte applicazioni ove la velocità del veicolo rimanga moderata è possibile considerare il coefficiente d'attrito volvente costante.

~ 6.1.3 Forza legata alla gravità in strade non orizzontali

La forza indotta della gravità quando guidiamo su una strada non orizzontale è conservativa e influenza il comportamento del veicolo considerabilmente.

Può essere modellata semplicemente come:

$$F_g(\alpha) = m_v g \sin(\alpha)$$

e per inclinazioni ridotte il seno dell'angolo è approssimabile con l'angolo stesso espresso in radianti.

~ 6.1.4 Forza d'inerzia

L'inerzia del veicolo e di tutte le masse rotanti in esso contenute, sono causa delle forze d'inerzia dovute alle accelerazioni del veicolo.

La forza d'inerzia legata al veicolo è già inclusa nel termine $m_v \frac{d}{dt} v(t)$ dell'equazione che descrive la dinamica longitudinale del veicolo.

L'inerzia delle masse rotanti può essere presa in considerazione nei rispettivi modelli, ma per un calcolo rapido, può essere conveniente aggiungere tale l'inerzia alla massa del veicolo.

L'analisi prende in considerazione il motore primo e la trasmissione con il suo rapporto totale di trasmissione.

La coppia d'inerzia totale vista alle ruote è data da :

$$T_r(t) = J_r \frac{d}{dt} w_r(t)$$

Dove J_r rappresenta l'inerzia di tutte le masse lato ruote del cambio, nell'ipotesi di considerare identica la velocità.

Tale coppia agisce sul veicolo come una forza addizionale $F_r = T_r/r_r$, dove r_r rappresenta il raggio delle ruote.

Considerando in prima approssimazione lo strisciamento delle ruote nullo, la velocità sarà $v = w_r r_r$.

$$F_r(t) = \frac{J_r}{r_r^2} \cdot \frac{d}{dt} v(t)$$

Di conseguenza il contributo delle ruote all'inerzia del veicolo sarà dato dal seguente termine:

$$m_r = \frac{J_r}{r_r^2}$$

Similarmente può essere calcolata l'inerzia del motore:

$$T_e(t) = J_e \frac{d}{dt} w_e(t) = J_e \frac{d}{dt} (\gamma \cdot w_r(t)) = J_e \frac{\gamma}{r_r} \frac{d}{dt} v(t)$$

Dove J_e è l'inerzia totale del sistema di trazione lato motore e γ il rapporto di trasmissione. Assumendo sempre la mancanza di strisciamento delle ruote, questa coppia trasferisce una forza alle ruote pari a:

$$F_e(t) = \gamma/r_r \cdot T_e(t) = J_e \left(\frac{\gamma}{r_r}\right)^2 \frac{d}{dt} v(t)$$

L'espressione è valida solo considerando una trasmissione ideale. Dato che l'inerzia così trovata va aggiunta ad un'inerzia molto più grande, l'errore causato da questa semplificazione è in generale ampiamente trascurabile.

Assumendo un rapporto di trasmissione costante, la forza precedente corrisponde ad una massa addizionale pari a $m_e = \gamma^2 / r_r^2 J_e$.

La totale massa equivalente delle parti rotanti, da aggiungere alla massa del veicolo, risulta quindi essere:

$$m_{eq} = m_r + m_e = \frac{1}{r_r^2} J_r + \frac{\gamma^2}{r_r^2} J_e$$

Per semplificare i calcoli, la massa equivalente può essere espressa come quella reale del veicolo maggiorata di un coefficiente.

La forza d'inerzia è molto influente nei tratti in cui le fermate e le ripartenze del veicolo sono molto frequenti, come durante l'uso urbano, mentre risulta meno importante nei tratti extraurbani a velocità quasi costanti.

~ 6.2 Motore a combustione interna

I motori a combustione interna sono macchine motrici termiche, che si propongono di convertire in lavoro meccanico la maggior parte dell'energia ottenibile dalla combustione del carburante all'interno della macchina stessa[4].

La denominazione interna sta quindi a significare che la combustione avviene all'interno della macchina, senza ricorrere ad un componente esterno come per esempio una caldaia.

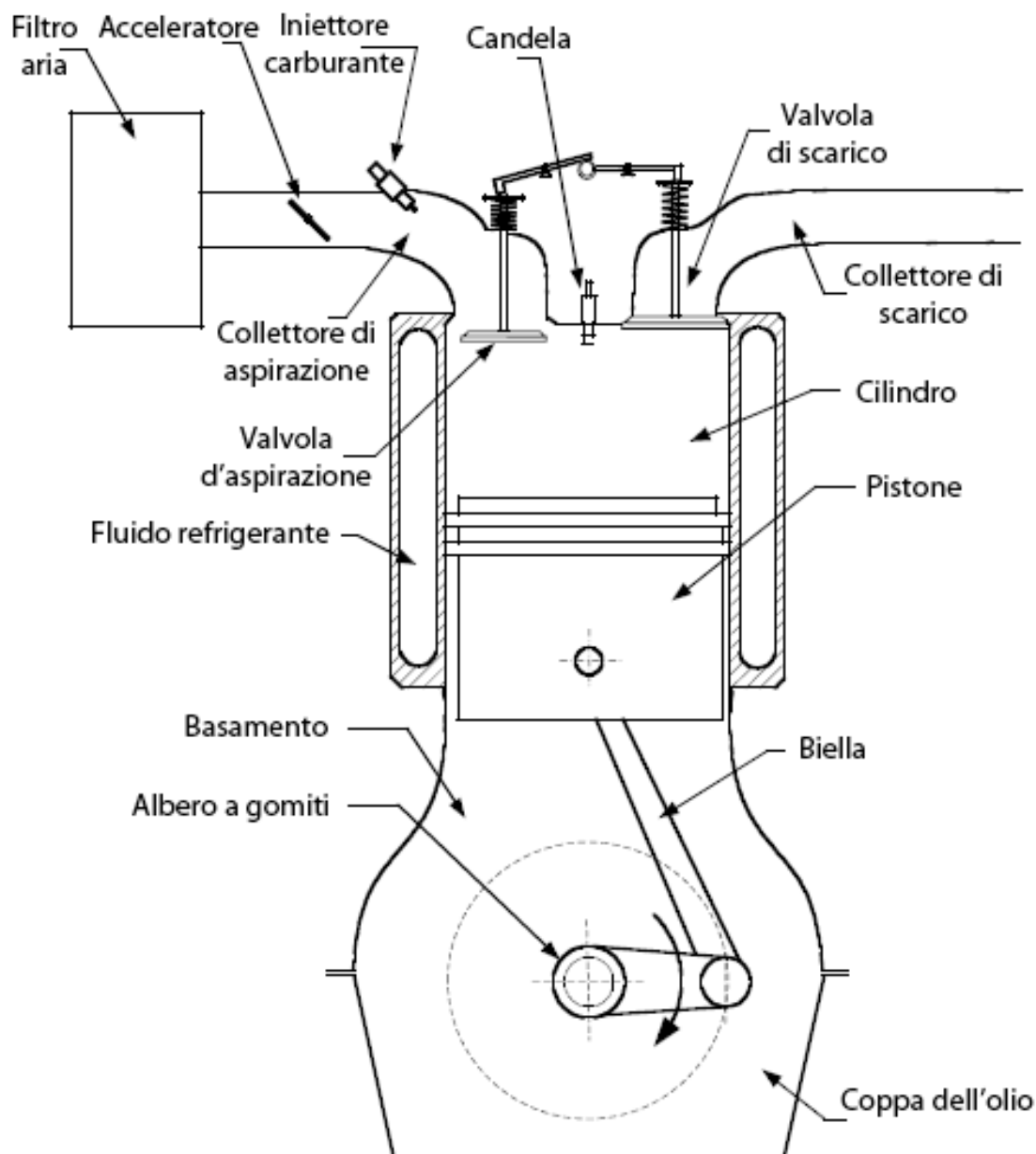


Figura 6.7 Schematizzazione di motore a benzina a 4 tempi

L'efficienza termodinamica di un motore può essere definita come:

$$\eta_m = \frac{\omega_m T_m}{P_c},$$

dove ω_m rappresenta la velocità angolare del motore, T_m la coppia e P_c la potenza chimica del carburante o più precisamente l'entalpia del carburante.

L'efficienza del motore, in prima approssimazione, dipende quindi principalmente dalla velocità e dalla coppia.

Esiste una ampia e ben documentata bibliografia che tratta la modellizzazione dei motori a combustione interna, descrivendo tutti i fenomeni rilevanti in gioco.

Per gli obiettivi prefissati è possibile semplificare la trattazione ipotizzando la dipendenza dell'efficienza del motore rispetto a coppia e velocità.

Le variabili coppia e velocità del motore hanno una chiara valenza fisica, sfortunatamente, esse dipendono direttamente dallo specifico motore preso in considerazione, quindi dal tipo di geometria, taglia, funzionamento.

Per questo motivo risulta necessario introdurre delle variabili normalizzate.

~ 6.2.1 Variabili normalizzate

Quando il motore funziona in condizione di regime è possibile definire due variabili normalizzate che descrivono il funzionamento del motore.

Queste due grandezze sono la velocità media del pistone:

$$c_m = \frac{\omega_m S}{\pi},$$

dove S rappresenta il numero di tempi e ω_m la velocità del motore.

Sicuramente più importante, la pressione media effettiva è definita come:

$$p_{m_e} = \frac{N \pi T_m}{V_d},$$

dove V_d rappresenta la cilindrata del motore, T_m la sua coppia e il parametro N , pari a 4 per i motori a 4 tempi e 2 per i motori a 2 tempi.

Naturalmente, la velocità media effettiva rappresenta la velocità media del pistone durante una rotazione, inoltre, è limitata inferiormente dalla velocità minima di rotazione del motore e superiormente dagli effetti legati agli attriti aerodinamici e meccanici. Un tipico valore massimo di c_m è 20 m/s.

La pressione media effettiva rappresenta la pressione che deve agire sul pistone, durante una fase di piena espansione, per produrre l'energia meccanica che una coppia costante del motore produrrebbe durante un ciclo completo. Rappresenta inoltre una misura dell'efficienza con cui il progettista è riuscito a sfruttare la cilindrata del motore per un dato regime di rotazione.

I valori massimi tipici per motori aspirati sono attorno a 10^6 Pa (10 bar), mentre per motori Diesel tale valore raggiunge i 20 bar.

Il vantaggio dell'utilizzo di tali variabili, risiede nella possibilità di approssimare tutti i motori simili, slegandoli di fatto dalla dimensione del motore.

Per motori dello stesso tipo, i limiti di velocità variano meno dei limiti di coppia, per questo motivo le mappe d'efficienza dei motori sono realizzate con la velocità del motore e non con la velocità media effettiva.

~ 6.2.2 Consumo specifico e efficienza

Il consumo specifico è una grandezza molto significativa ai fini di poter stabilire con quale grado di efficienza un motore sta utilizzando il combustibile per produrre energia meccanica ed è definito come:

$$C_{sc} = \frac{\dot{m}_c}{P_m},$$

dove \dot{m}_c rappresenta la portata di combustibile e P_m la potenza del motore.

Esso trova grande impiego nella pratica per quantizzare i problemi connessi con la gestione di un motore, presenta però l'inconveniente di non essere una grandezza adimensionale [5].

Nell'uso comune è di solito espresso in g/h/Kw, ossia g/kWh, o riconducendosi al sistema internazionale in g/MJ.

Un parametro adimensionale, che eviti queste complicazioni, può essere ottenuto sostituendo la portata del combustibile con l'energia da essa convogliata nell'unità di tempo.

Ottenendo così il consumo specifico d'energia:

$$C_{se} = \frac{\dot{m}_c H_i}{P_m},$$

dove H_i rappresenta il potere calorifico inferiore.

Il suo reciproco rappresenterà il rendimento globale del motore $\eta_g = 1/C_{se}$, misura dell'efficienza con cui l'energia contenuta nel combustibile è convertita in lavoro meccanico.

Per modellizzare l'efficienza del motore, quindi, faremo uso delle mappe d'efficienza che rappresentano immediatamente il contributo relativo dato dalle diverse condizioni di funzionamento al consumo di combustibile da parte del motore.

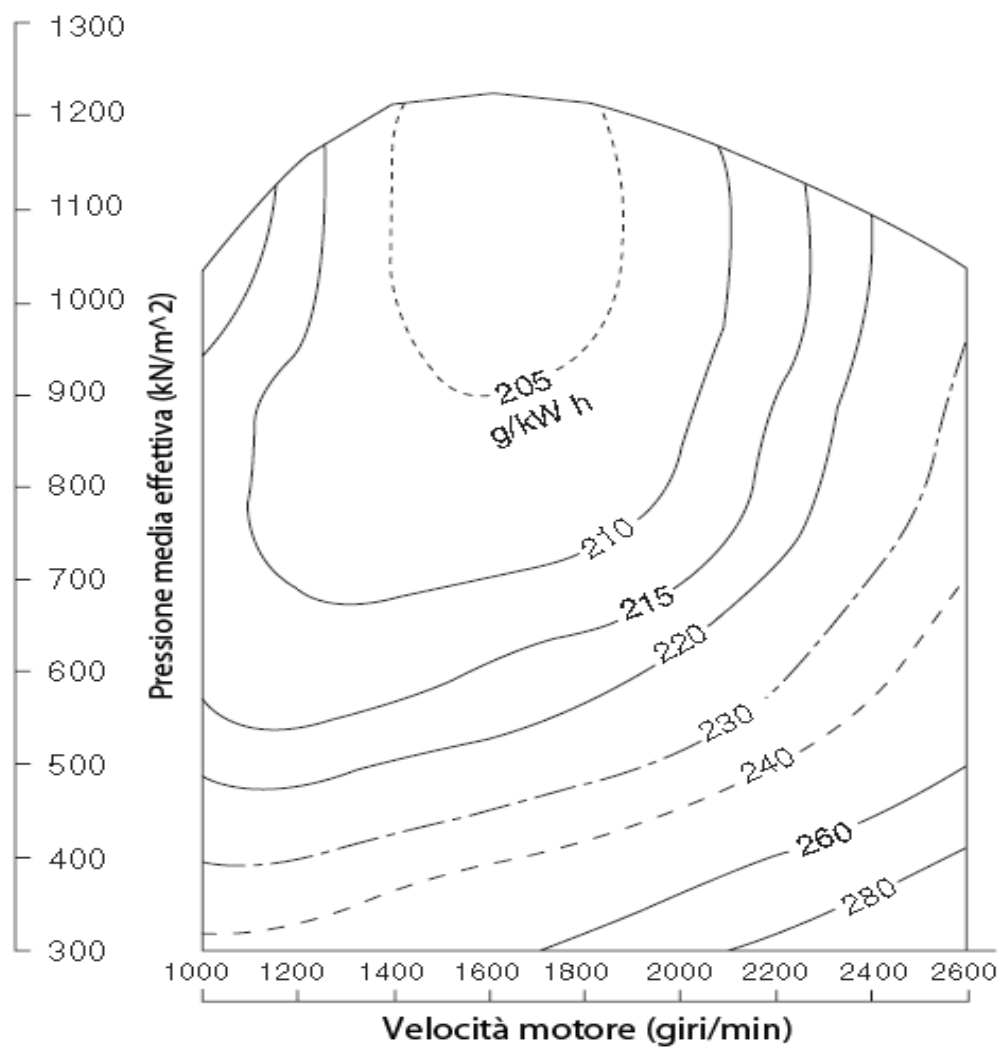


Figura 6.8 Esempio di mappa d'efficienza di un motore

~ 6.3 Trasmissione e cambio

In ambito dei trasporti su strada, il cambio e al trasmissione sono fondamentali perché permettono di variare il rapporto tra il regime motore e il regime delle ruote al fine di ottenere una coppia appropriata alle ruote, il motore infatti presenta regimi di rotazione ottimali diversi a seconda che occorra privilegiare il rendimento chilometrico (generalmente a velocità costante), la coppia e potenza (per la velocità massima, la ripresa, accelerazione, salite etc..) o regime di sottocoppia (per i fondi innevati o a bassa aderenza).

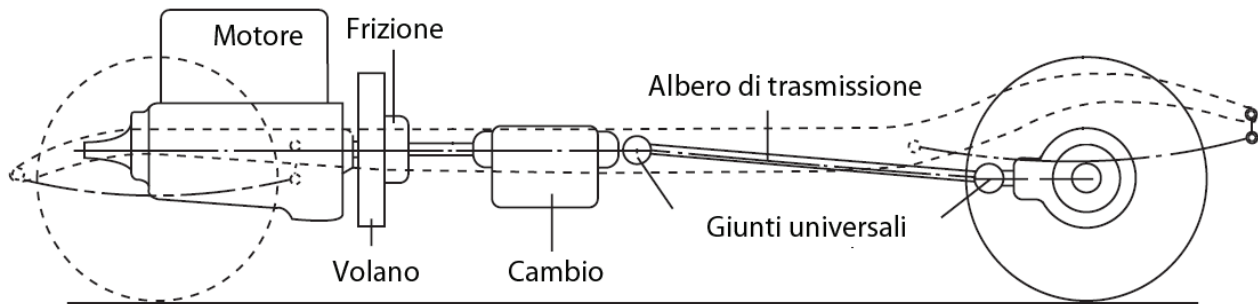


Figura 6.9 Schema di un sistema di trasmissione

In generale il cambio agisce come riduttore di velocità, anche se le marce più elevate (quinta, sesta, settima o oltre) spesso forniscono all'albero di trasmissione una velocità angolare maggiore di quella del motore.

Il cambio è l'elemento che trasmette la potenza meccanica proveniente dal motore modificandone i parametri di velocità e coppia.

Ipotizzando trascurabili tutte le perdite causate dal cambio, possiamo considerare le seguenti relazioni:

$$\omega_1 = K\omega_2 \quad T_2 = KT_1,$$

dove K rappresenta il rapporto di cambio.

Nelle applicazioni pratiche si incontrano solitamente tre tipi di cambio [2]:

- Cambio manuale: presenta un numero finito di rapporti, scelti manualmente dal guidatore;
- Cambio automatico: permette di selezionare automaticamente il rapporto senza l'intervento umano, semplificando notevolmente la guida;
- Cambio continuo o CVT (continuously variable transmission): il rapporto di trasmissione può variare senza soluzione di continuità tra due valori limite, compensando progressivamente le variazioni del veicolo facendo andare il motore sempre al suo regime di coppia massima. Ciò aumenta la resa energetica e riduce le emissioni inquinanti.

~ 6.3.1 Efficienza del cambio

Le equazioni viste in precedenza sono valide solo se l'efficienza del cambio è del 100 %, cosa possibile solo con un cambio ideale.

Le perdite causate da un cambio o da altri componenti simili dipendono da molti fattori: velocità, carico, temperatura, solo per nominare i più importanti.

La figura seguente mostra la struttura del sistema analizzato e illustra le variabili in gioco.

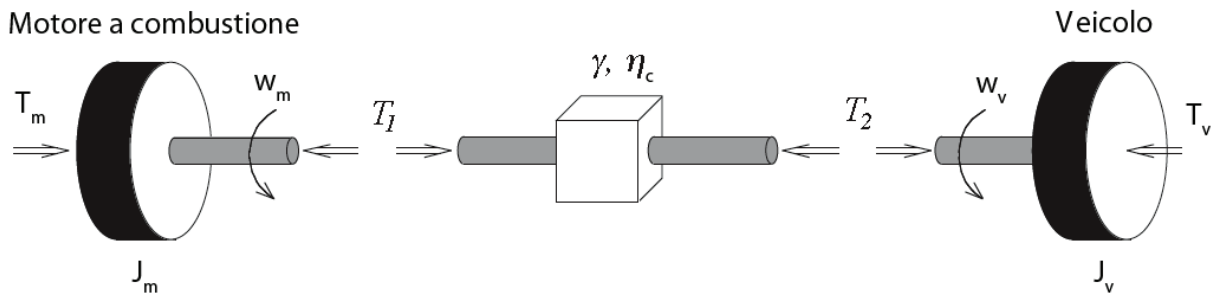


Figura 6.10 Variabili rilevanti per la modellizzazione di un cambio

Un approssimazione delle perdite [2] di un cambio può essere formulata utilizzando la dipendenza della potenza in ingresso nel cambio con la potenza in uscita:

$$T_2 \omega_v = e_c T_1 \omega_m - P_{0_c}(\omega_e), \quad T_1 \omega_e > 0$$

Dove P_{0_c} è la potenza che il cambio necessita per poter funzionare alla velocità ω_e , questa equazione è valida solo se il veicolo è in fase di trazione.

Se $T_1 \omega_e < 0$, un'equazione simile può essere formulata per la descrizione delle perdite del cambio:

$$T_1 \omega_m = e_c T_2 \omega_v - P_{1_c}(\omega_e), \quad T_1 \omega_e < 0$$

Il parametro e_c rappresenta l'efficienza del cambio, in ambito automobilistico i valori tipici vanno dal 95% al 97 %. In funzione della grandezza del cambio e del sistema di lubrificazione, le perdite P_{0_c} possono raggiungere fino al 3 % della potenza nominale del cambio.

~ 6.4 Motore asincrono trifase

La scelta del motore elettrico da utilizzare per la trazione del veicolo ibrido è ricaduta sulla macchina asincrona trifase, caratterizzata da: semplicità costruttiva, affidabilità e robustezza nonché dalla facilità di controllo.

La macchina asincrona trifase è costituita da uno statore cilindrico cavo esterno e da un rotore cilindrico, calettato sull'albero, tra di essi è interposto un traferro di spessore costante.

Sia lo statore, sia il rotore sono di materiale ferromagnetico laminato e i lamierini vengono sovrapposti in senso assiale [6].

Le due strutture sono dotate di cave rivolte verso il traferro, in cui vengono alloggiati i conduttori attivi per realizzare gli avvolgimenti trifase di statore e di rotore, aventi lo stesso numero di poli.

Gli avvolgimenti così ottenuti si possono collegare a stella o triangolo.

Un motore realizzato in questa maniera è detto a rotore avvolto, esiste inoltre una seconda modalità costruttiva, detta a gabbia di scoiattolo, costituita da una serie di barre poste nelle cave di rotore e collegate tra di loro mediante due anelli di corto circuito (vedi figura 6.11).

A causa degli elevati costi, della necessità di manutenzione e dalla mancanza di robustezza, i motori asincroni a rotore avvolto sono meno appetibili rispetto a quelli a gabbia, specialmente per un utilizzo in ambito automobilistico.

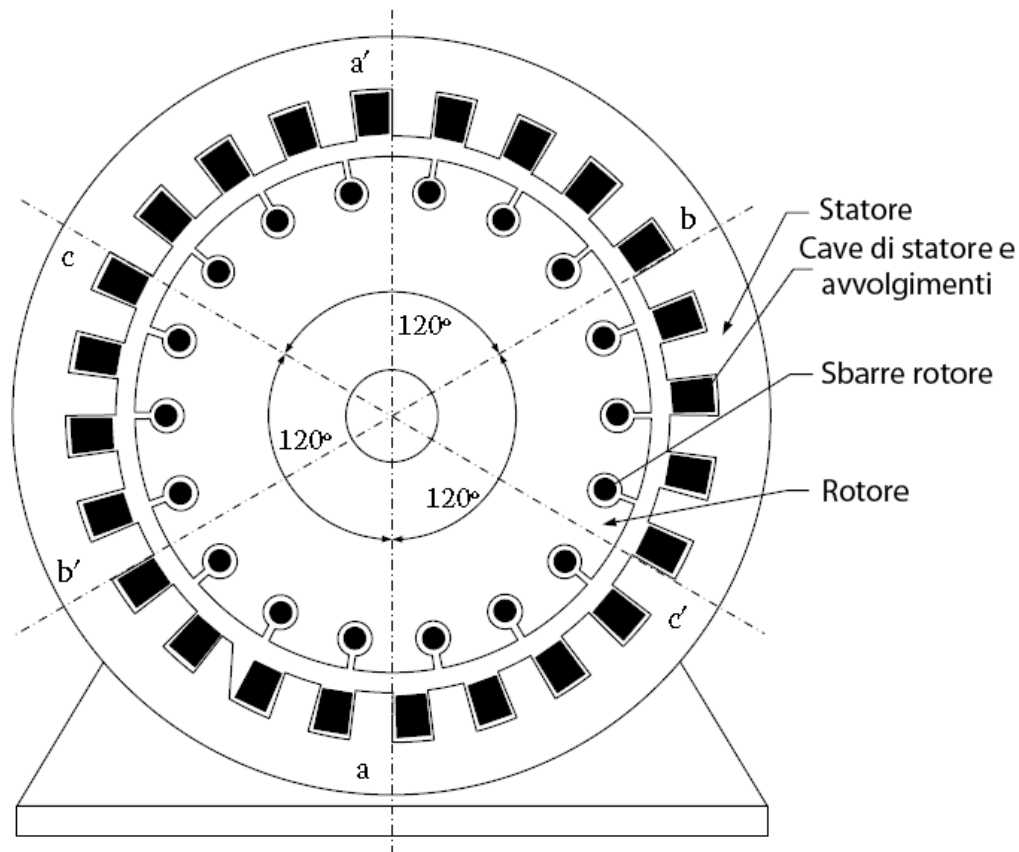


Figura 6.11 Vista in sezione di un motore asincrono trifase con rotore a gabbia di scoiattolo

La modellizzazione scelta per il motore asincrono verte sulla rappresentazione del comportamento dinamico del sistema. Il modello utilizzato si basa sulle seguenti ipotesi semplificative:

- Si considera la macchina a 2 poli, i risultati ottenuti sono poi estendibili a macchine generiche di n poli;
- Si ritiene la permeabilità dei circuiti ferromagnetici costante e di valore molto maggiore rispetto alla permeabilità del vuoto;
- Si suppone che ogni avvolgimento sia di rotore che di statore crei un diagramma di forza magnetomotrice al traferro da andamento spaziale sinusoidale.

Nello studio della macchina asincrona la macchina è vista come un insieme di induttori interagenti, portando alla formulazione del seguente sistema di equazioni [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + p \bar{\psi}_s + j(\omega_s \bar{\psi}_s) \\ \bar{V}_r = 0 = R_r \bar{i}_r + p \bar{\psi}_r + j(\omega_r \bar{\psi}_r) = R_r \bar{i}_r + p \bar{\psi}_r + j(\omega_s - \omega_m) \bar{\psi}_r \\ p \omega_m = \frac{n}{J} (C_e - C_r) \end{array} \right. \quad \text{Modello } V \text{ ordine}$$

Esplicitando le due componenti dei vettori di Park e ricavando le derivate, ottenere il modello in forma normale:

$$\left\{ \begin{array}{l} p \psi_{sd} = V_{sd} - R_s i_{sd} + \omega \psi_{sq} \\ p \psi_{sq} = V_{sq} - R_s i_{sq} - \omega \psi_{sd} \\ p \psi_{rd} = -R_r i_{rd} + (\omega_s - \omega_m) \psi_{rq} \\ p \psi_{rq} = -R_r i_{rq} + (\omega_s - \omega_m) \psi_{rd} \\ p \omega_m = \frac{n}{J} (C_e - C_r) \end{array} \right. \quad \text{Modello } V \text{ ordine in forma normale}$$

Le variabili di stato sono le quattro componenti nei flussi di statore e rotore più la velocità meccanica espressa in radianti elettrici.

Il sistema è chiaramente non lineare (flussi e velocità meccaniche sono tra loro moltiplicati), è presente un unico ingresso rappresentato dalla tensione impressa sullo statore, chiaramente nelle sue due componenti.

Per meglio rappresentare il reale funzionamento della macchina il modello tiene conto anche del fenomeno della saturazione del materiale ferromagnetico.

~ 6.5 Supercondensatore

Prima di osservare il principio di funzionamento dei supercondensatori si ricorda brevemente come si comportano i più comuni condensatori elettrostatici.

Nei condensatori elettrostatici classici applicando un potenziale tra le due armature parallele del dispositivo si ottiene una circolazione di elettroni nel circuito esterno; questo fenomeno provoca un accumulo di carica su ciascun piatto e quindi costituisce una separazione di carica a una distanza “d” definita come spessore del dielettrico. Quando il potenziale viene rimosso i due piatti rimarranno carichi, a meno delle perdite, fintantoché i terminali non saranno rimessi a contatto; in tal caso si avrà la scarica del condensatore.

La quantità di carica che può essere accumulata in relazione al potenziale applicato viene detta capacità elettrica “C” e rappresenta l’attitudine che possiede un condensatore ad accumulare energia. Si osserva dunque che la capacità di un condensatore è direttamente proporzionale alla superficie degli elettrodi e inversamente proporzionale alla loro distanza [7].

$$C = \frac{Q}{V} = \varepsilon \frac{S}{d}$$

dove C rappresenta la capacità espressa in Farad, Q la carica in Coulomb, V il potenziale in Volt, ε la costante dielettrica del mezzo espressa in F/m, S la superficie in m^2 e d la distanza tra le armature in m.

Vien dunque da sé che per distanze via via decrescenti tra armature di dimensioni sempre più estese si ottiene una capacità di valore sempre più elevato.

Il condensatore elettrochimico invece, come si osserva dalla figura 6.12, è caratterizzato da una costruzione molto simile a quella di una batteria; esso ha sostanzialmente due elettrodi, e un separatore permeabile agli ioni, posto tra gli elettrodi, che contiene l’elettrolita.

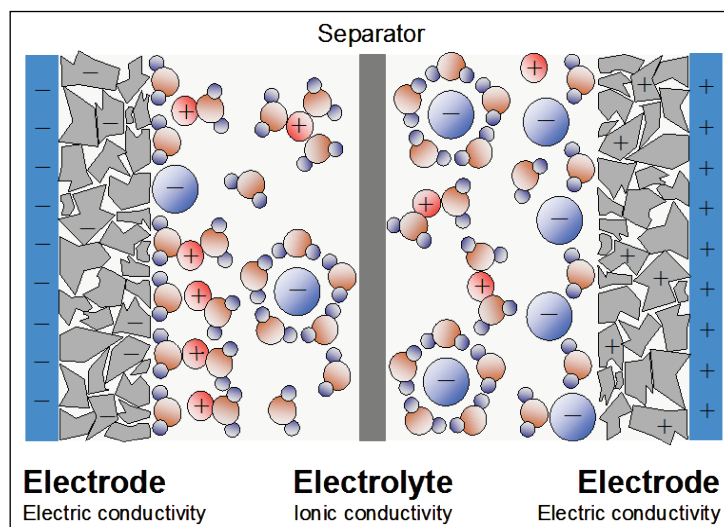


Figura 6.12 Struttura interna del supercondensatore

Gli elettrodi porosi sono immersi in una soluzione elettrolitica. Applicando una piccola differenza di potenziale ai capi degli elettrodi si innesca un processo di separazione di carica indotto dalla presenza di un campo elettrico. La zona in cui sono concentrate tali cariche è chiamata anche doppio strato, proprio da qui che il supercondensatore prende il nome di “double layer”. I condensatori elettrochimici immagazzinano dunque energia nel doppio strato detto anche strato di Helmholtz che si viene a formare all’interfaccia elettrodo-elettrolita. Qui ioni carichi positivamente o negativamente si accumulano all’interfaccia elettrodo-elettrolita e sono compensati da elettroni che si dispongono sulla superficie dell’elettrodo. Lo spessore di tale strato dipende dalla concentrazione dell’elettrolita e dalla dimensione degli ioni. Tipicamente, come si osserva anche dalla figura 6.13, si hanno spessori dell’ordine dei 2-10 Angstrom (Å) [7].

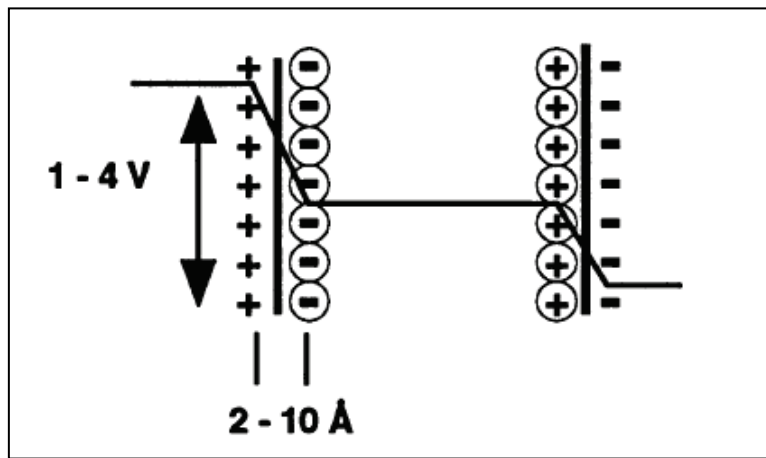


Figura 6.13 Distanza della separazione di carica all’interfaccia elettrodo-elettrolita

Gli elettrodi sono concepiti in modo da costituire un’elevata superficie e sono realizzati con materiale poroso avente pori del diametro dell’ordine dei nanometri in modo tale da massimizzare la superficie del doppio strato. L’area superficiale dei materiali impiegati negli elettrodi dei supercapacitori è assai maggiore di quella degli elettrodi tradizionali, difatti nelle applicazioni attuali si ottengono anche superfici dell’ordine di migliaia di metri quadri, equiparabili addirittura con la superficie di un campo da calcio. La carica e l’energia immagazzinate da un supercondensatore sono valutabili con le espressioni già conosciute per i condensatori; mentre la trattazione si complica per la determinazione della capacità in quanto si devono interpretare e rappresentare fenomeni fisici complessi che avvengono nei microfori presenti negli elettrodi.

I supercondensatori sono dotati di elevata capacità specifica, che dipende dall’alta area superficiale del carbone; in aggiunta però alla capacità derivante dalla separazione di cariche che si ottiene nel doppio strato si ha un contributo anche da reazioni che possono avvenire sulla superficie del carbone. Tali reazioni, di natura elettrochimica, danno origine ad un ulteriore accumulo di energia elettrica. Nel supercondensatore a doppio strato si è osservato che il principio di funzionamento si basa principalmente sulla separazione delle cariche per via dell’applicazione di una differenza di potenziale tra i due elettrodi; non si hanno quindi trasferimenti di elettroni tra elettrodi e elettrolita.

Si può inoltre esaminare come l'energia specifica immagazzinabile dai condensatori elettrochimici a doppio strato sia superiore rispetto a quella dei condensatori elettrostatici a parità di campo elettrico applicato, in quanto in un condensatore tradizionale l'energia specifica U_{sp} risulta:

$$U_{sp} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2,$$

dove U_{sp} è l'energia specifica per unità di volume (J/m^3), ϵ_0 la costante dielettrica del vuoto espressa in F/m, ϵ_r la costante dielettrica relativa adimensionale legata al dielettrico impiegato e E il campo elettrico espresso in V/m.

Si osserva dunque che a pari campo elettrico materiali con costante dielettrica relativa maggiore sono in grado di immagazzinare più energia.

Gli EDLC (electric double layer capacitor) caratterizzati dunque da materiali con alta costante dielettrica relativa hanno la proprietà di immagazzinare più energia (costante dielettrica relativa dei titanati di bario: 100 - 6000).

Si può inoltre osservare come i supercondensatori possiedano un'energia U maggiore a pari potenziale applicato per via della maggiore area offerta dal dielettrico e minore distanza "d" di separazione di carica.

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} V^2,$$

Il modello scelto [8] per la rappresentazione del comportamento di un supercondensatore è rappresentato nella figura successiva.

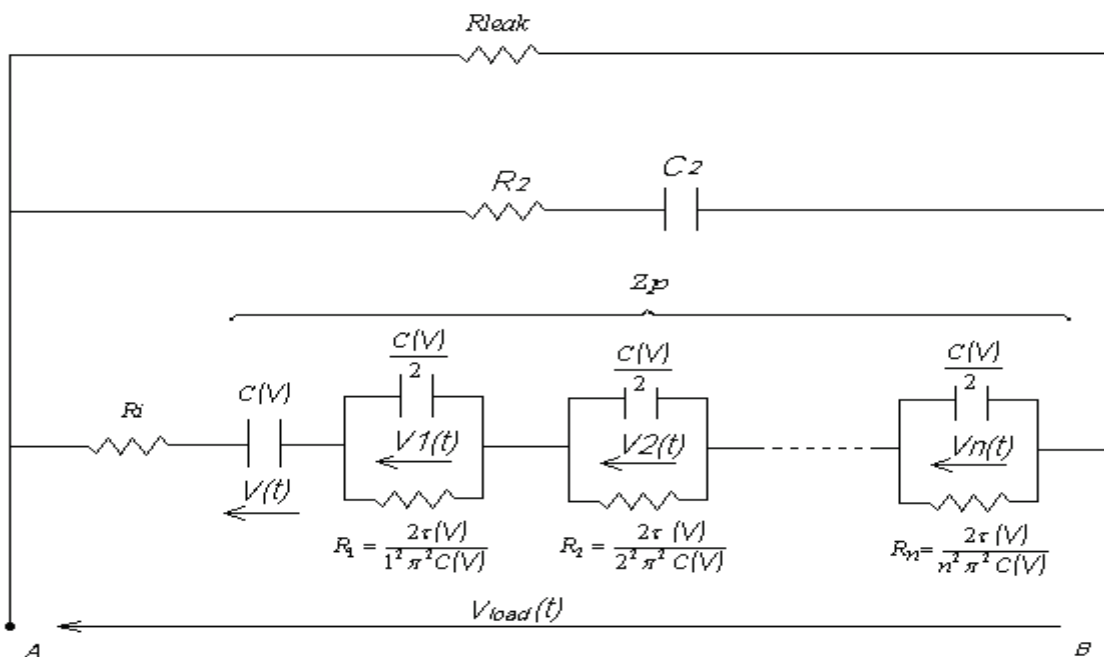


Figura 6.14 Modello ibrido del supercondensatore

Tale modello permette di rappresentare vari fenomeni che avvengono nel supercondensatore a partire dall'autoscarica per arrivare al fenomeno di redistribuzione delle cariche.

Questo modello ibrido è in grado di tenere conto di fenomeni che spaziano da frequenze bassissime, sino a frequenze dell'ordine delle centinaia di kHz, tenendo quindi in considerazione il reale comportamento dinamico del dispositivo.

L'utilizzo di un modello che rappresenti la completa dinamica del dispositivo risulta particolarmente utile in applicazioni automotive dove i supercondensatori sono sottoposti a fenomeni dinamici molto veloci, come le frenate a recupero di energia e le accelerazioni.

Per ultimo ma non meno importante è la facilità di ottenere i parametri del modello attraverso una semplice procedura che consta di una prova a corrente di carica costante.

Bibliografia

- [1] Thomas D. Gillespie, “Fundamentals of vehicle dynamics”, SAE International 1992, ISBN 9781560911999.
- [2] Lino Guzzella, Antonio Sciarretta, “Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization” 2nd edition, Springer Verlag 2007, ISBN 9783540746911.
- [3] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi, “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles” 2nd edition, CRC Press 2010, ISBN 9781420053982.
- [4] John B. Heywood, “Internal Combustion Engines Fundamentals”, McGraw Hill Inc. 1988 ISBN 9780070286375.
- [5] Ferrari Giancarlo, “Motori a combustion interna”, Edizioni Il Capitello, ISBN 9788842670063.
- [6] Ubaldini Mario, “Macchine elettriche”, Edizioni Esculapio, ISBN 9788885040861.
- [7] Roberto Ferrabue, Vincenzo Musolino, “Supercondensatori: nuovo modello e prestazioni”, Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Milano Dipartimento di Elettrotecnica, Anno accademico 2006/2007.
- [8] Enrico Tironi, Vincenzo Musolino, “Supercapacitor Characterization in Power Electronic Applications: Proposal of a New Model”, International Conference on Clear Electrical Power 2009.

Per ulterior approfondimenti:

- [1] Uwe Kiencke, Lars Nielsen, “Automotive Control Systems: For Engine, Driveline, and Vehicle”, Springer Verlag 2005, ISBN 3540231390.
- [2] Rena N. Jazar, “Vehicle Dynamics: Theory and Application”, Springer Science 2008, ISBN 9780387742434.
- [3] Rajesh Rajamani, “Vehicles dynamics and Control”, Springer Science 2006, ISBN 9780387263960

7 Simulazione di un veicolo a benzina

Per poter valutare i benefici apportati dall'implementazione di un veicolo ibrido, sia esso serie o parallelo, è necessario rapportarsi ad un veicolo convenzionale che rappresenti il riferimento sul quale basarsi.

Utilizzando i modelli introdotti nel capitolo precedente è possibile simulare a grandi linee, dal punto di vista energetico, il funzionamento di un veicolo a benzina e i suoi consumi.

L'approccio utilizzato, come già accennato in precedenza, è prettamente statico o quasi-statico e ovviamente non è adatto alla rappresentazione di fenomeni dinamici. Esistono, infatti, approcci numerici che meglio si adattano ad una corretta e efficiente rappresentazione di tali fenomeni, tra i quali troviamo: i disturbi e le vibrazioni legati al sistema di trazione o i problemi legati all'aderenza del veicolo.

La simulazione del veicolo utilizza come ciclo guida di riferimento il ciclo europeo NEDC (New European Drive Cycle) costituito da 4 cicli urbani ECE-15 e da un ciclo finale extraurbano EUDC (Extra Urban Drive Cycle) come si può ben vedere da figura 7.1.

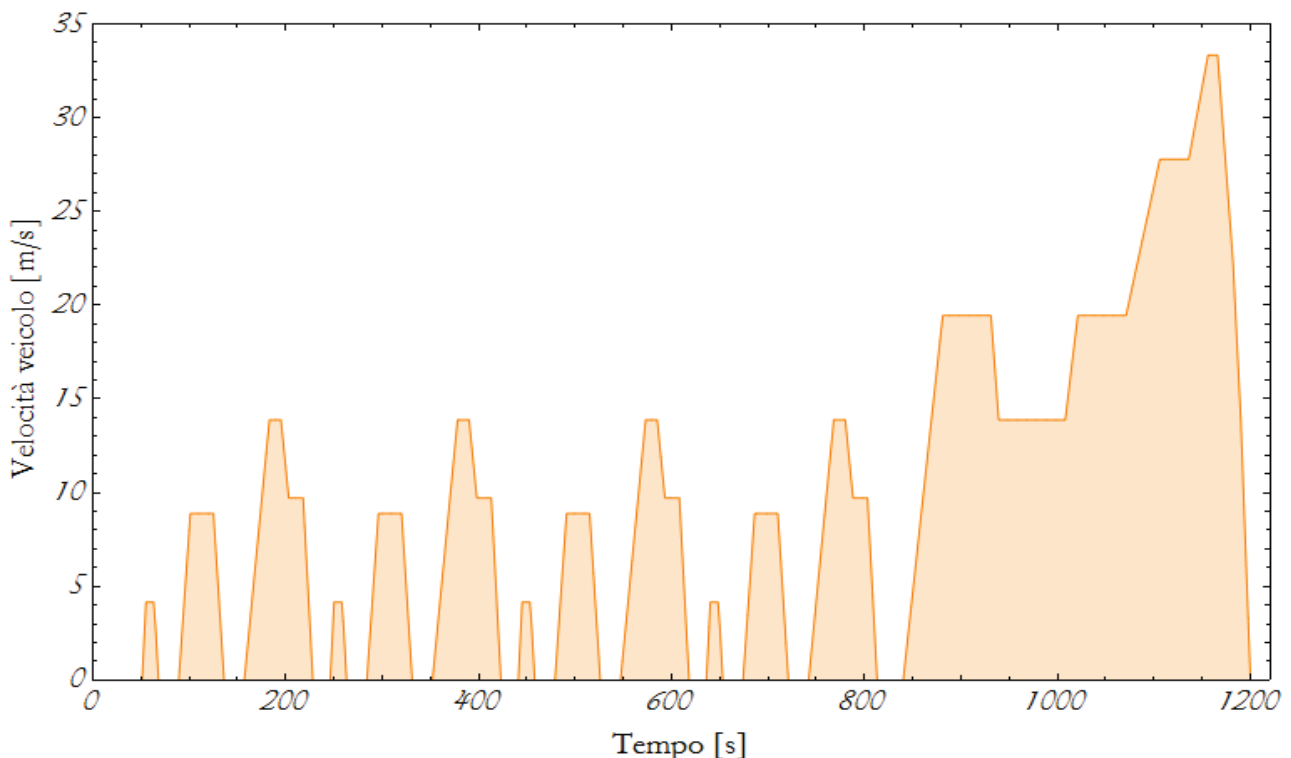


Figura 7.1 Ciclo di guida europeo NEDC

Il modello completo rappresentato nella pagina successiva, in funzione della velocità assunta dal veicolo, calcola la dinamica longitudinale ricavandone la coppia resistente vista dal veicolo. Una volta ottenuti coppia e velocità, tenendo conto del cambio e delle sue perdite, tali valori vengono utilizzati per calcolare la potenza erogata dal motore e il consumo di carburante tramite le mappe d'efficienza.

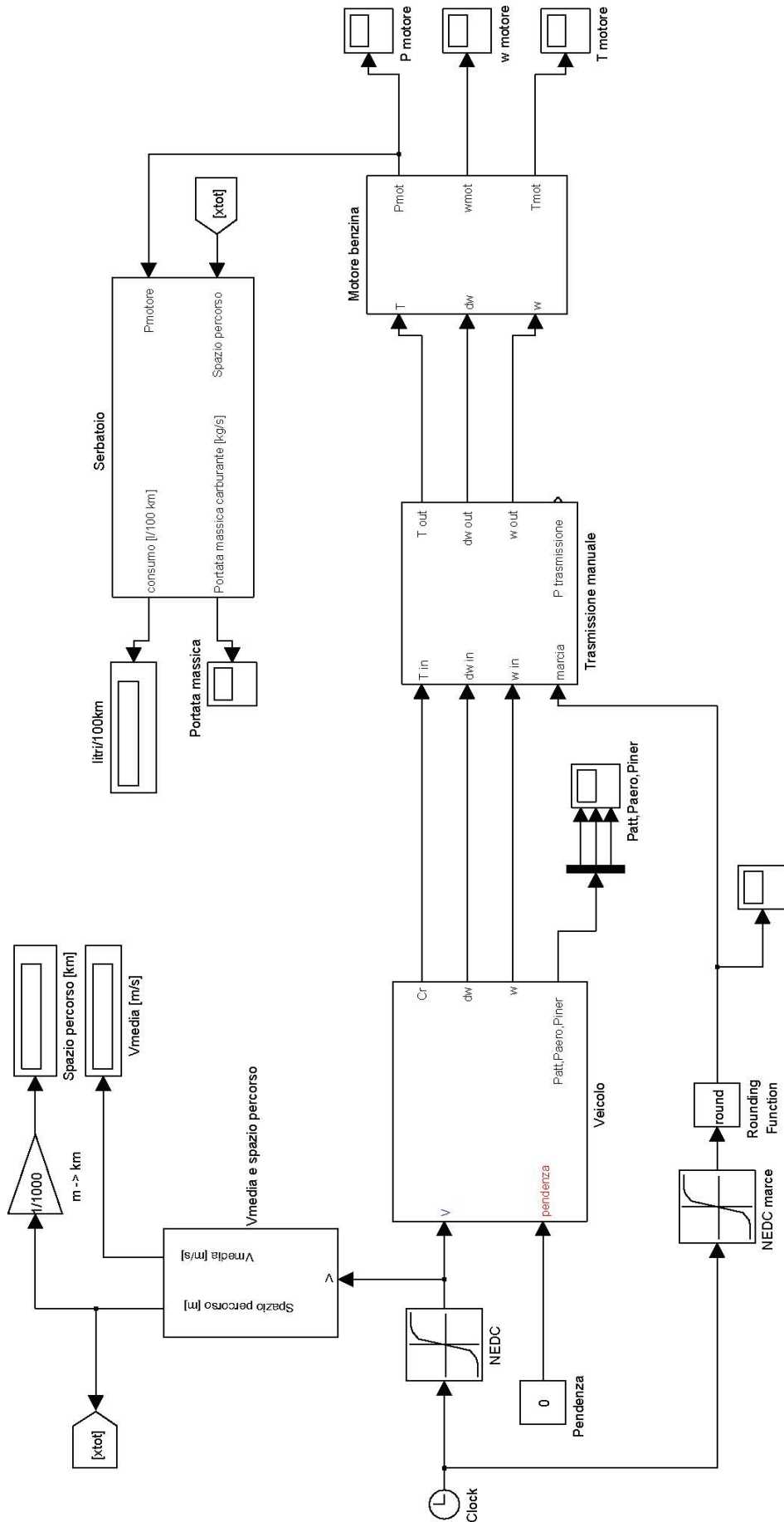


Figura 7.2 Modello Matlab del veicolo a benzina

Caratteristiche del veicolo	
Massa del veicolo [Kg]	1100
Tipologia motore	Benzina
Cilindrata motore [cm ³]	1398
Raggio ruote [m]	0,35

Tabella 7.1 Dati del veicolo di riferimento

Definito il profilo di velocità è possibile ricavare le forze agenti sul veicolo. Tali forze riguardano l'attrito volvente, la resistenza aerodinamica, la componente verticale del moto e l'inerzia.

Calcolata la forza totale agente sul veicolo, si può facilmente ricavare la coppia resistente che il veicolo incontra durante il ciclo di guida (figura 7.3).

Essendo una coppia vista alle ruote del veicolo, basta moltiplicare la forza totale per il raggio della ruota.

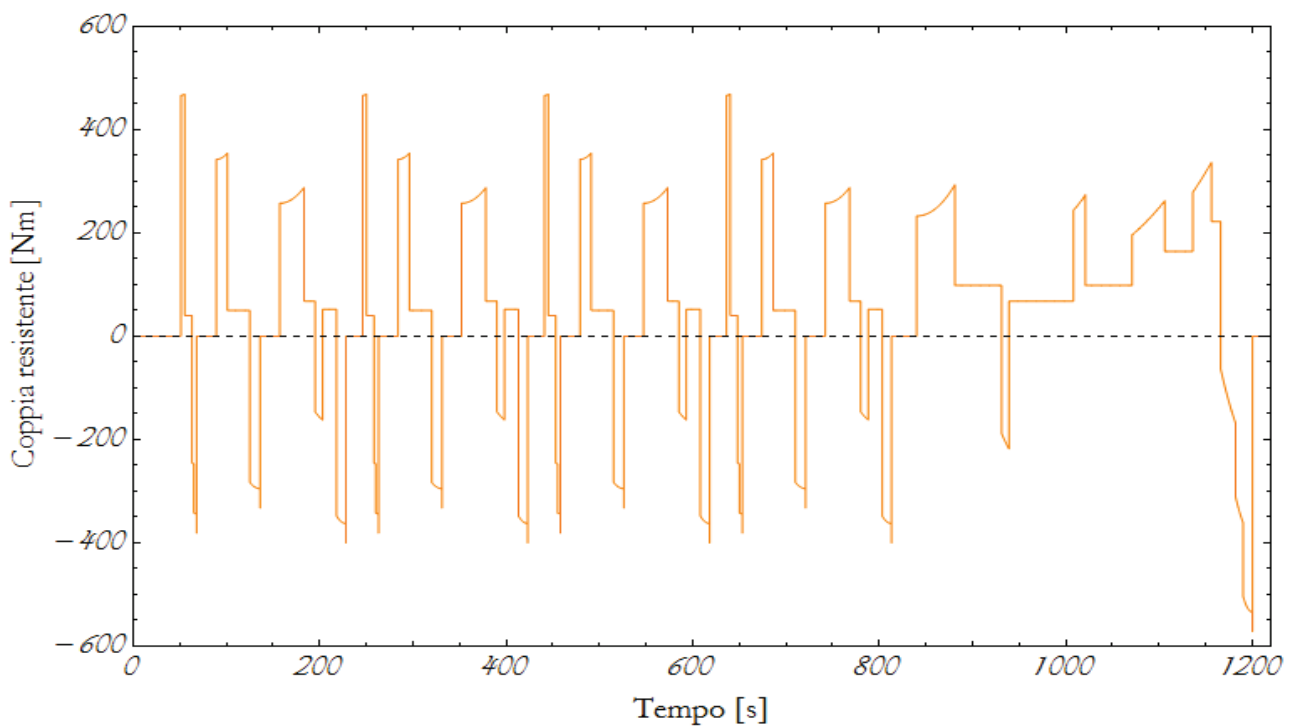


Figura 7.3 Coppia resistente del veicolo a benzina lungo il ciclo

Preso in considerazione la presenza del sistema di trasmissione e del cambio è possibile ricavare coppia e velocità visti all'albero del motore a scoppio e di conseguenza pervenire alla potenza meccanica erogata.

La potenza meccanica vista all'albero del motore a benzina risulta quindi:

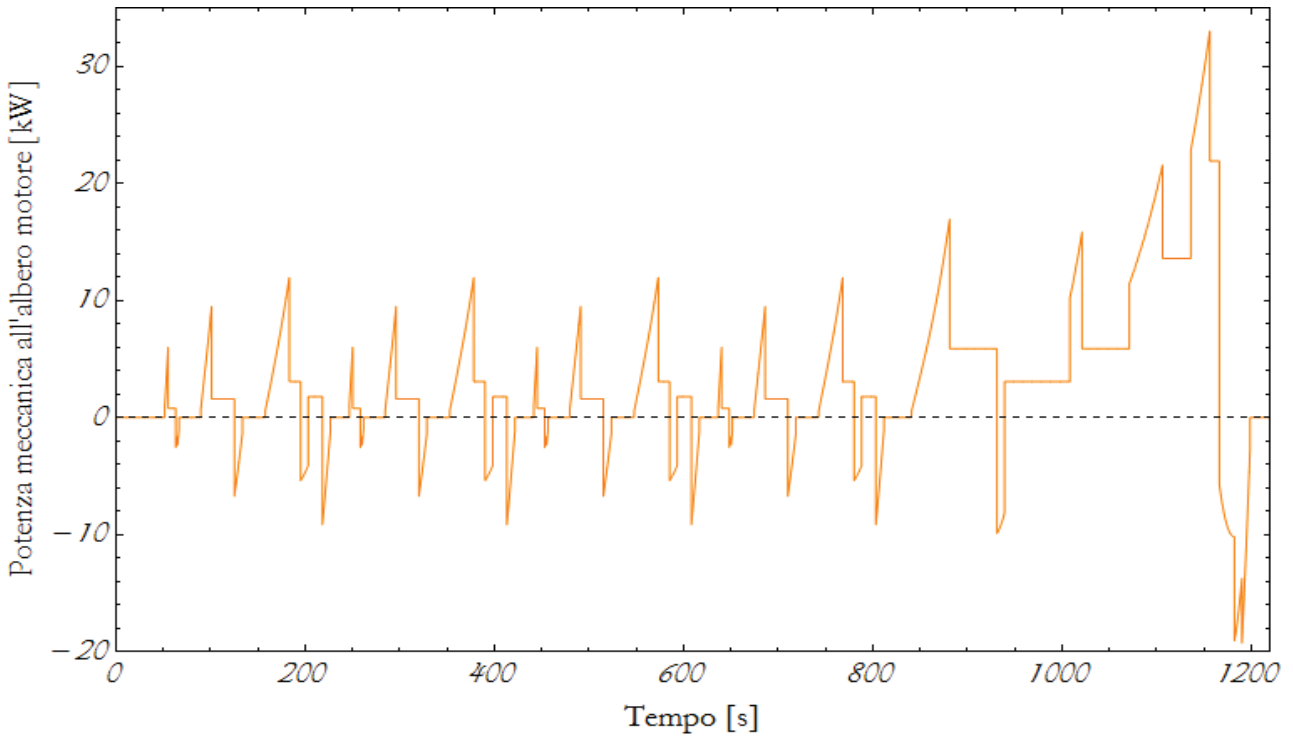


Figura 7.4 Potenza meccanica all'albero del motore a benzina

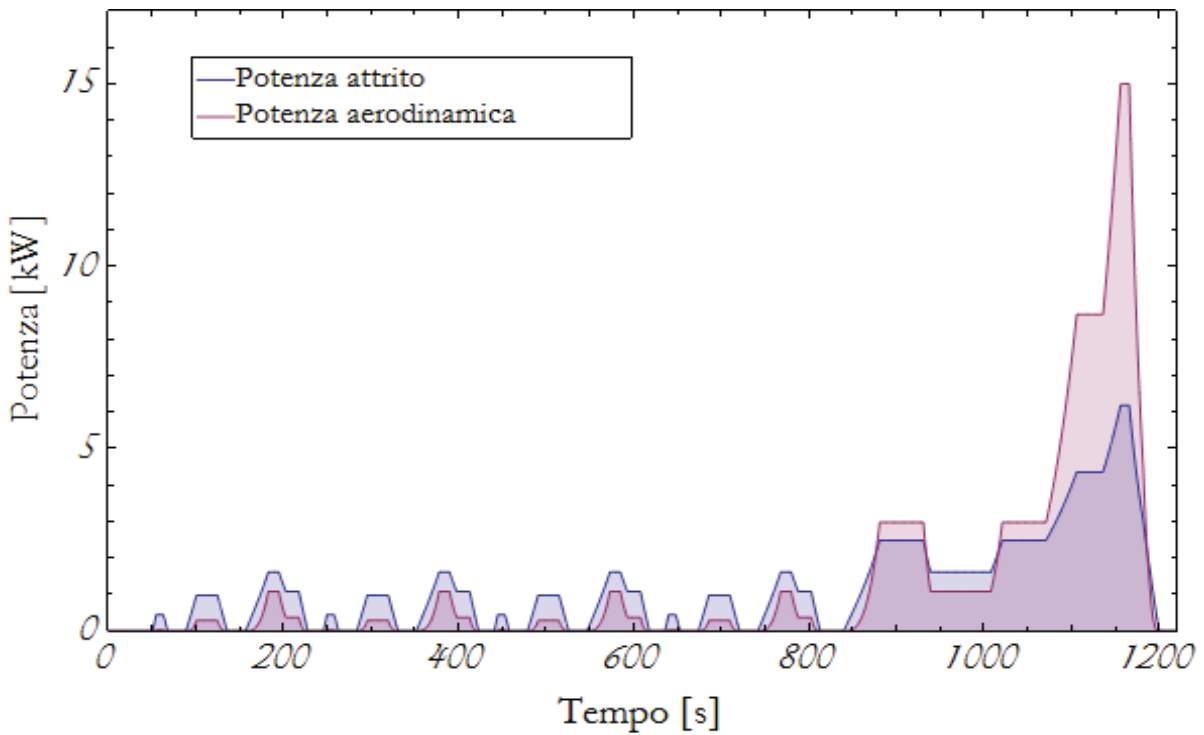


Figura 7.5 Potenza aerodinamica e d'attrito a confronto e velocità del veicolo

Dalla figura precedente si può notare come la potenza legata all'attrito volvente delle ruote sia superiore rispetto alla potenza aerodinamica alle basse velocità, mentre per velocità elevate tale potenza ha il sopravvento. Nei percorsi autostradali, dove si raggiungono velocità elevate, la maggior resistenza incontrata dal moto del veicolo è rappresentata essenzialmente dalla resistenza aerodinamica.

Analizzando meglio la potenza all'albero si nota che in concomitanza delle decelerazioni la potenza meccanica cambia segno (vedi figura 7.6). Questa parte di energia è a tutti gli effetti è recuperabile, almeno in parte, grazie al motore elettrico presente nei veicoli ibridi, mentre in un veicolo convenzionale rappresenta energia persa.

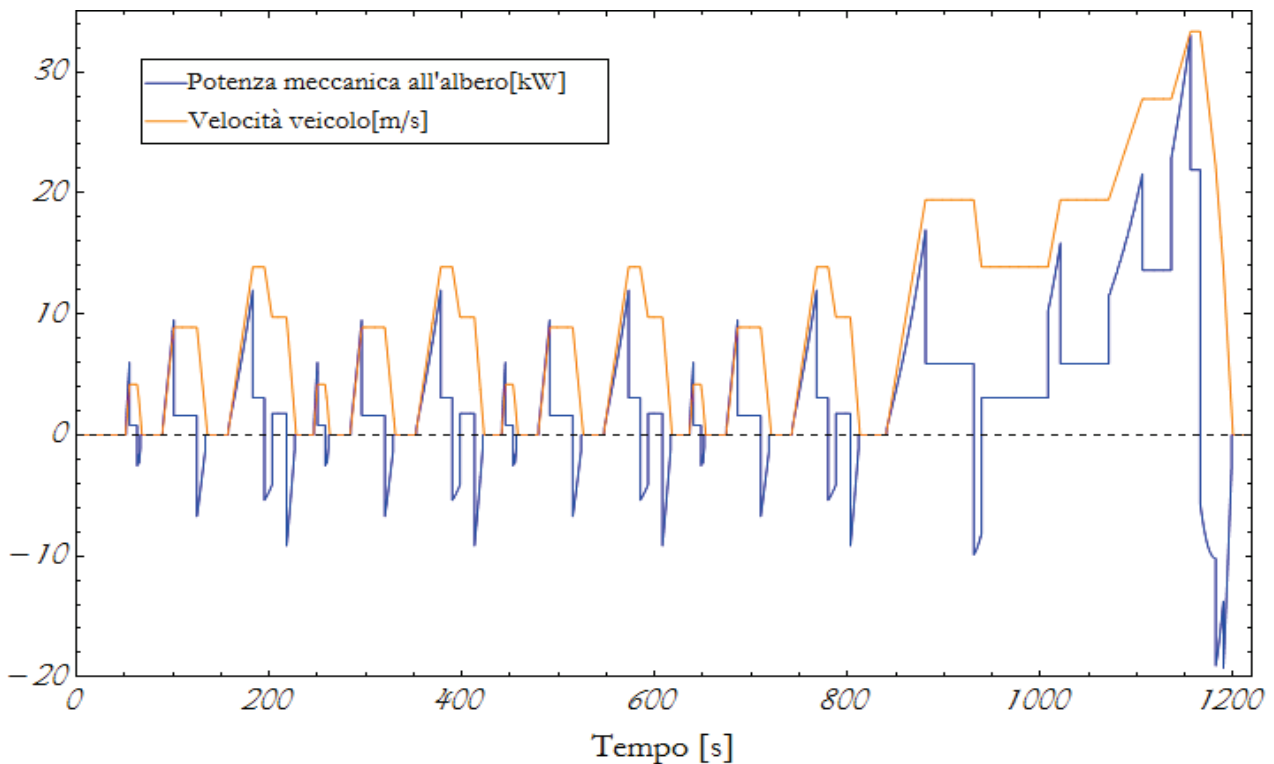


Figura 7.6 Confronto tra velocità del veicolo e potenza meccanica all'albero di motore

Altro dato ricavabile è la potenza media all'albero che risulta essere pari a 2.79 kW che sta a dimostrare come in ambito urbano la potenza necessaria al veicolo è molto bassa e a differenza di quello che si può pensare il veicolo stesso non richiede potenze troppo elevate.

Per ricavare la potenza chimica necessaria, come già accennato nel capitolo precedente, si utilizza la mappa d'efficienza del motore che permette di relazionare a ciascuna coppia di velocità, il proprio consumo di carburante.

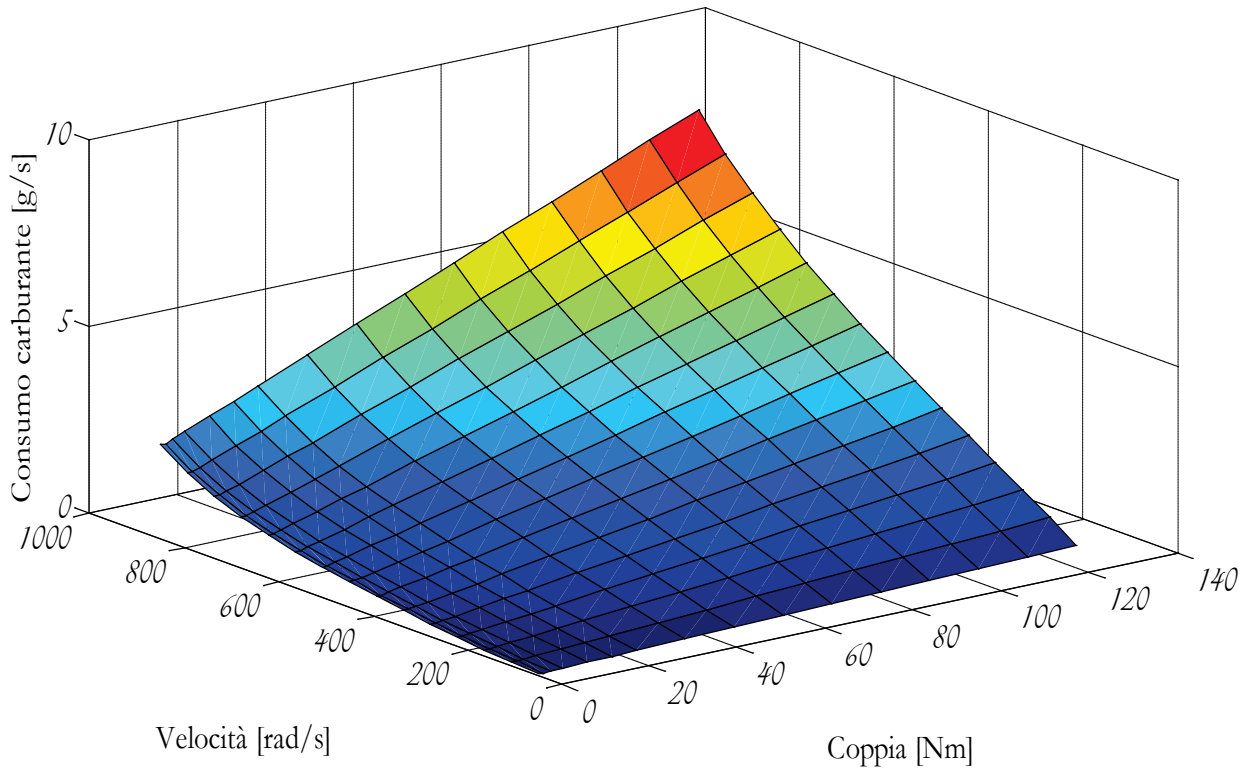


Figura 7.7 Mappa d'efficienza del motore utilizzato

Il consumo in grammi al secondo di combustibile da parte del motore è:

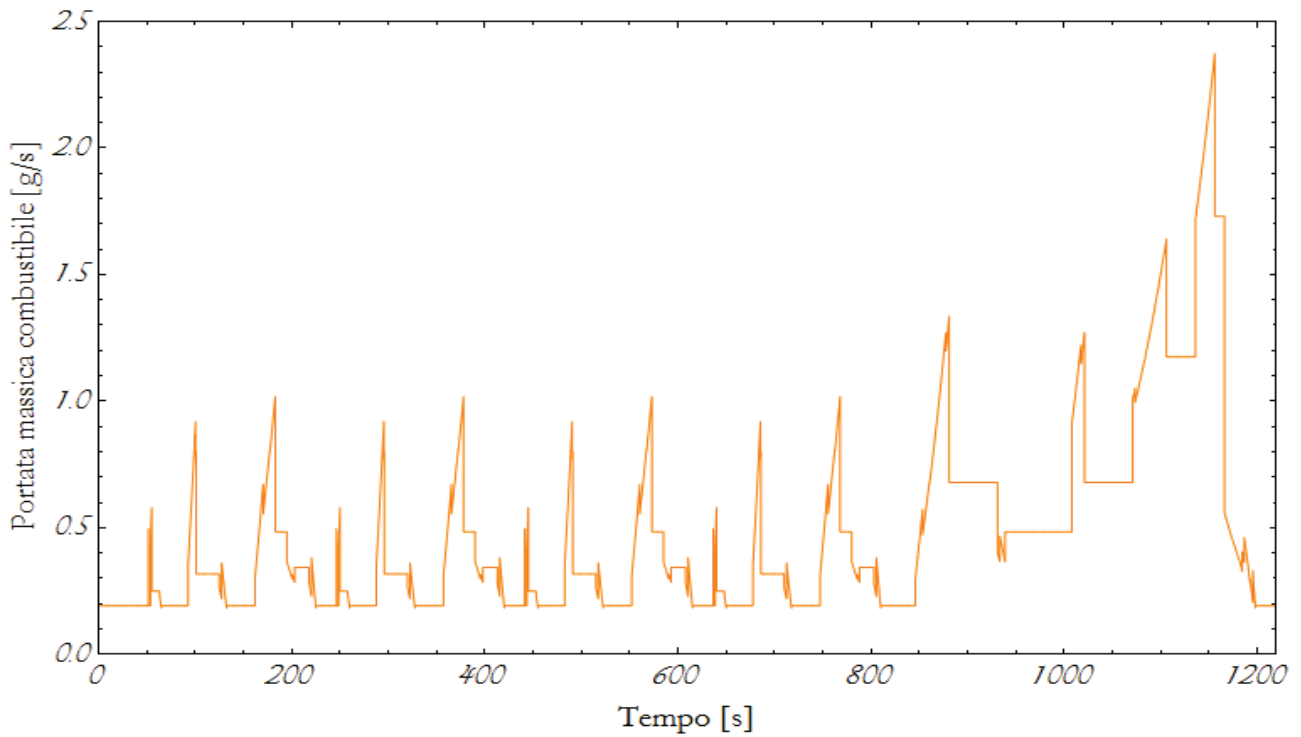


Figura 7.8 Portata massica di combustibile

Mentre la potenza chimica richiesta dal motore, ricavabile semplicemente dal consumo, moltiplicandolo per il potere calorifico del combustibile utilizzato, risulta essere pari:

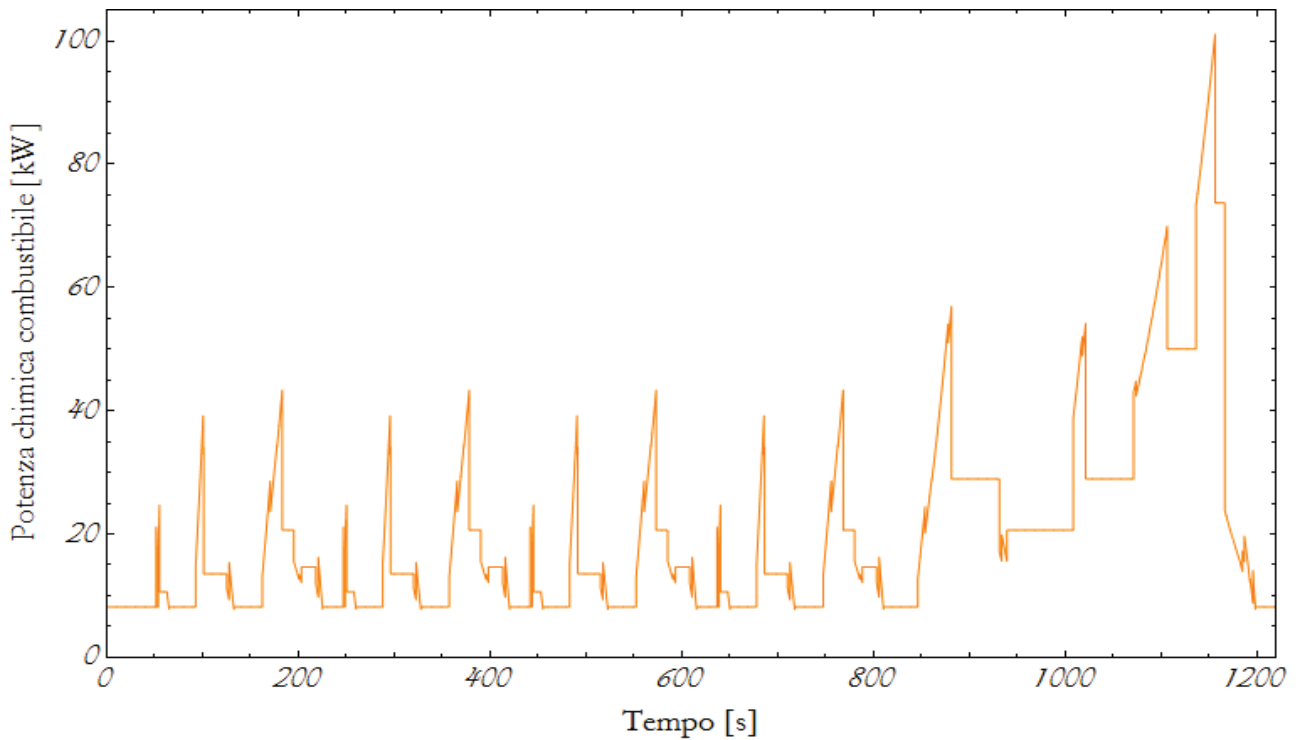


Figura 7.9 Potenza chimica del motore a benzina

Confrontando la figura 7.5 e 7.6 si può notare come con un modello statico del motore, i consumi abbiano un andamento simile se non identico a quello della potenza.

Al termine della simulazione il veicolo consuma per compiere tutto il ciclo di guida prefissato 7.987 litri ogni cento chilometri pari a 12,52 km/l.

Per meglio capire come il motore a benzina lavori durante il ciclo, basta guardare la figura successiva che riporta la mappa dei rendimenti del motore in funzione di coppia e velocità.

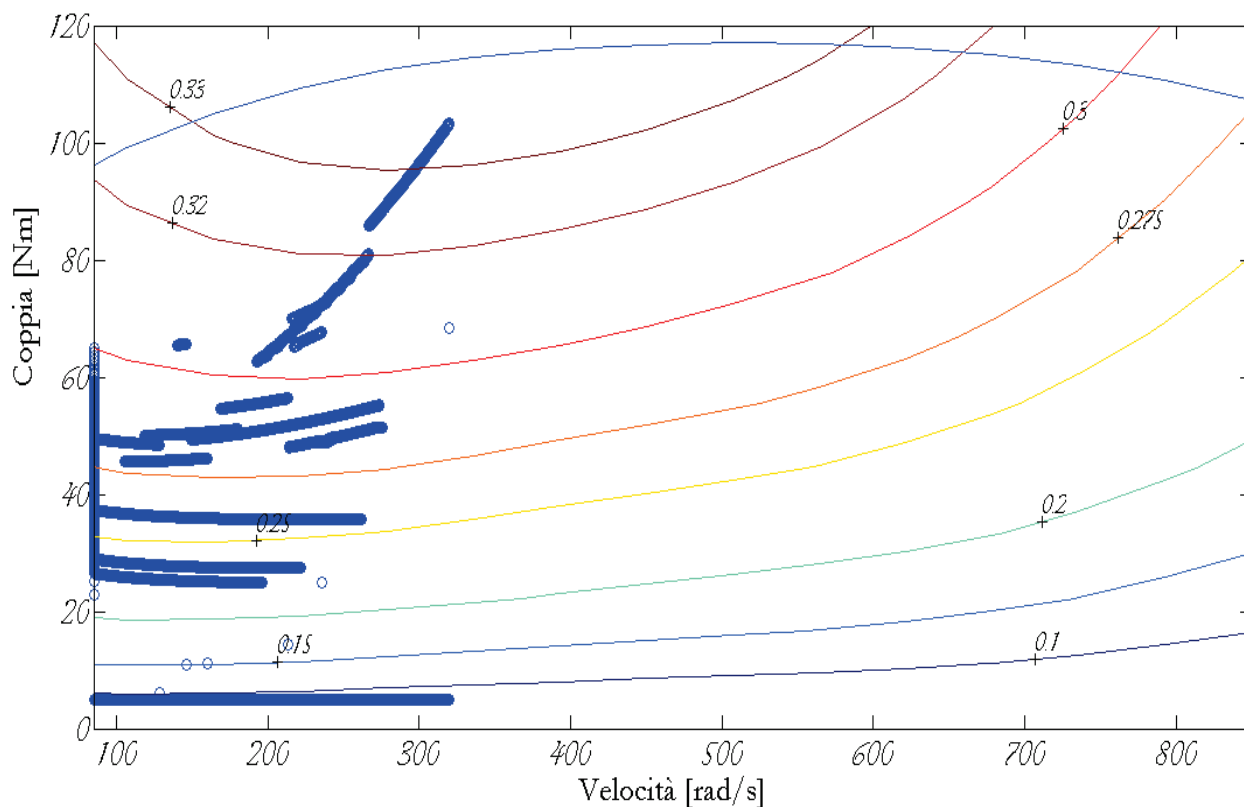


Figura 7.10 Mappa dei rendimenti in funzione di coppia e velocità, con riportato i punti di funzionamento del motore a benzina

Come si può ben notare dalla figura 7.10, per la maggior parte del tempo, il motore a benzina lavora in punti a rendimento basso, lontano dalla curva di ottimo. Per questo motivo l'efficienza di un veicolo convenzionale è inferiore all'efficienza di un veicolo ibrido.

Particolare attenzione va posta nei tratti in cui il veicolo risulta essere fermo, in quei tratti del ciclo guida il motore eroga una potenza necessaria al fine di evitare il proprio spegnimento. Tale energia prodotta con rendimenti molto bassi intacca notevolmente l'efficienza e il consumo finale del motore, soprattutto in un ciclo di riferimento che presenta molti tratti in cui il veicolo è fermo. Questa situazione è chiaramente riscontrabile nel funzionamento di un veicolo su un percorso tipicamente urbano.

Questa situazione va presa in particolare considerazione quando si passa da un veicolo convenzionale ad uno ibrido, per evitare di vanificare completamente i benefici portati da quest'ultimo.

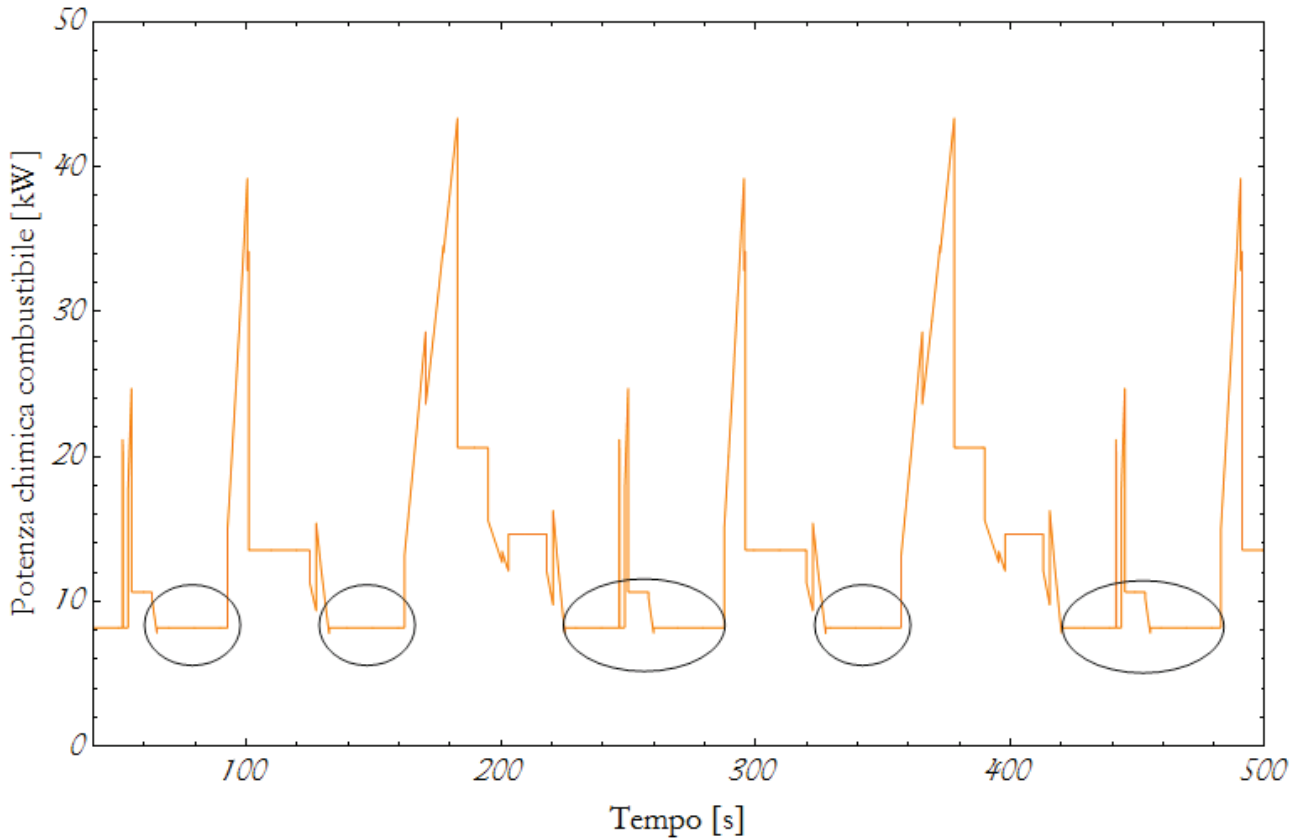


Figura 7.11 Particolare della potenza chimica richiesta dal motore

La presenza del cambio, il cui compito è di variare il rapporto tra il regime motore e il regime delle ruote al fine di ottenere una coppia appropriata alle ruote, non è di per sé sufficiente a garantire che per ogni punto di funzionamento si ottenga il rendimento migliore.

Una possibile soluzione a livello meccanico del problema, implica l'utilizzo di un cambio continuo [1] capace di variare continuamente il rapporto di trasmissione, al fine di ottenere istante per istante il rapporto di trasmissione ottimo.

Un altro approccio volto a migliorare l'efficienza del veicolo, consiste nel sottodimensionamento del motore, annotando che per la maggior parte del tempo il motore lavora a carichi medio bassi. Sottodimensionando il motore, permetto a quest'ultimo di lavorare mediamente con carichi maggiori e a rendimenti più elevati.

La coppia mancante verrà fornita dal motore elettrico.

Per ulteriori informazione e delucidazioni sui modelli e sui parametri utilizzati in Matlab, fare riferimento all'Appendice.

Bibliografia

- [1] Lino Guzzella, Antonio Sciarretta, “Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization” 2nd edition, Springer Verlag 2007, ISBN 9783540746911.
- [2] Giorgio Rizzoni, Lino Guzzella, Bernd M. Baumann, “Unified Modeling of Hybrid Electric Vehicle Drivetrains”, IEEE/ASME Transactions On Mechatronics Vol. 4 N. 3, Settembre 1999

8 Simulazione del veicolo ibrido elettrico

serie

L'obiettivo prefissato di queste simulazioni è di andare a valutare la fattibilità dell'utilizzo dei supercondensatori come sistema di accumulo in un veicolo ibrido serie e il loro dimensionamento.

Il modello utilizzato per la simulazione del veicolo ibrido, si basa sull'implementazione utilizzata in precedenza nella simulazione del veicolo a benzina con le necessarie modifiche.

La prima di esse riguarda la dinamica longitudinale del veicolo, laddove non viene più considerato e calcolato il contributo relativo all'inerzia, perché tale effetto risulta essere già implementato direttamente nel modello del motore asincrono trifase.

Oltre all'aggiunta del motore asincrono e relativo controllo, il modello contempla l'utilizzo dei supercondensatori come sistema d'accumulo, la rappresentazione schematica del gruppo generatore e raddrizzatore attraverso un rendimento costante e pari all'85%.

Le altre componenti mancanti, ossia inverter e chopper sono considerate ideali e di rendimento unitario, allo scopo di ridurre i tempi di simulazione e semplificare il più possibile il modello.

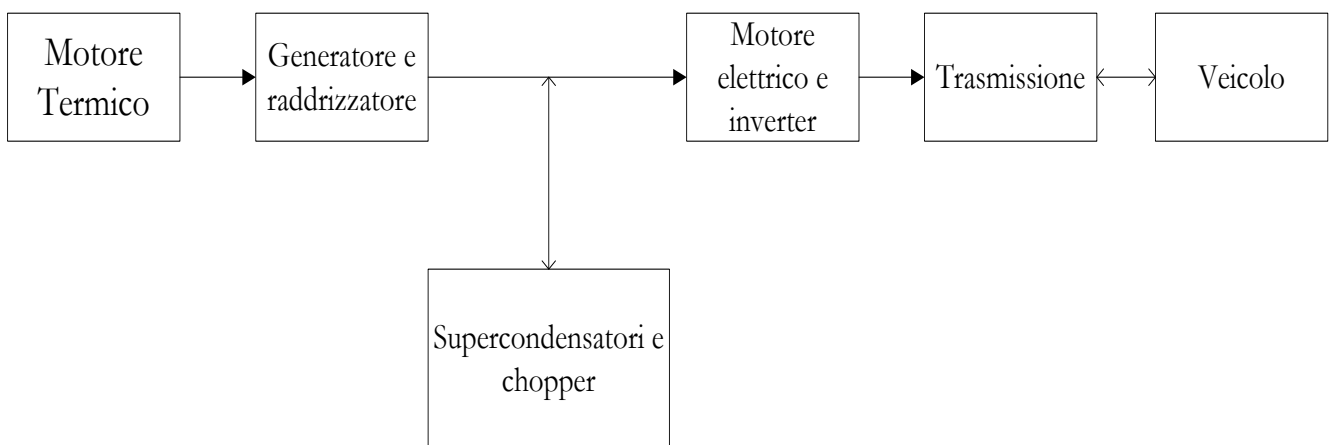


Figura 8.1 Schema a blocchi rappresentativo di un veicolo ibrido serie

Nella modellizzazione sopra esposta, non si considera tutta quella serie di dinamiche che interessano il bus di trasmissione in corrente continua né tantomeno il relativo controllo della tensione, considerando quest'ultimo ideale e quindi a tutti gli effetti trascurabile.

La figura successiva mostra il modello Matlab completo, dove la parte superiore è adibita alla dinamica del veicolo e alla sua trazione con il motore elettrico.

La parte inferiore riguarda essenzialmente il bilancio delle potenze, il sistema d'accumulo e il motore diesel con la propria logica di controllo.

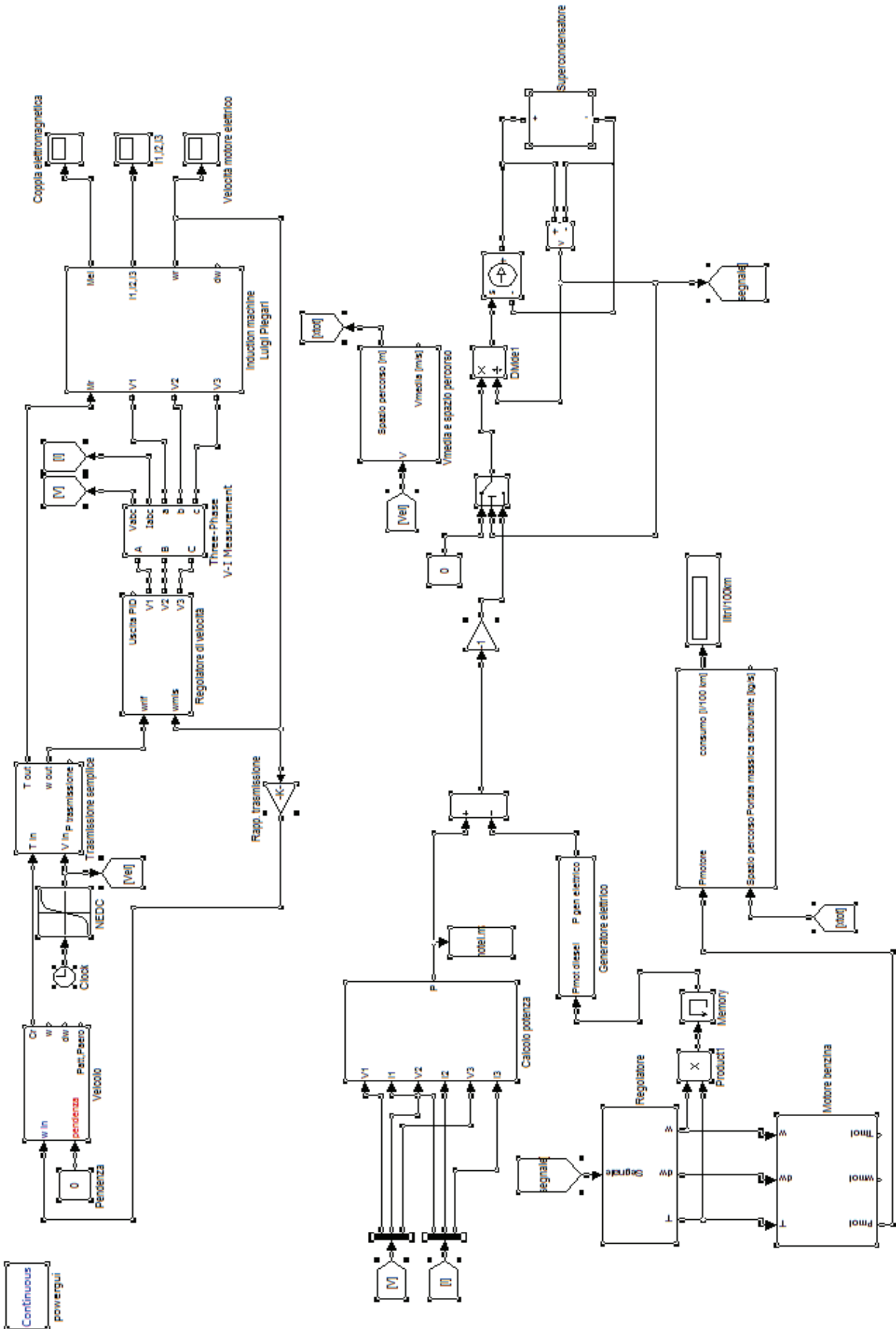


Figura 8.2 Modello Matlab completo del veicolo ibrido serie.

~ 8.1 Dimensionamento del sistema di accumulo

Come accennato nei capitoli precedenti, la scelta del sistema d'accumulo da utilizzare ricade sui supercondensatori, grazie alle proprie prestazioni dinamiche che ne rendono di fatto la soluzione ideale per accumulare energia in tempi ridotti.

Partendo dall'assunto che il ciclo di guida rappresenta un ciclo di fatto chiuso, per dimensionare il sistema d'accumulo faccio riferimento alla potenza elettrica assorbita dal motore asincrono, immaginando che sostituisca il motore termico nella trazione del veicolo.

La potenza assorbita risultante sarà:

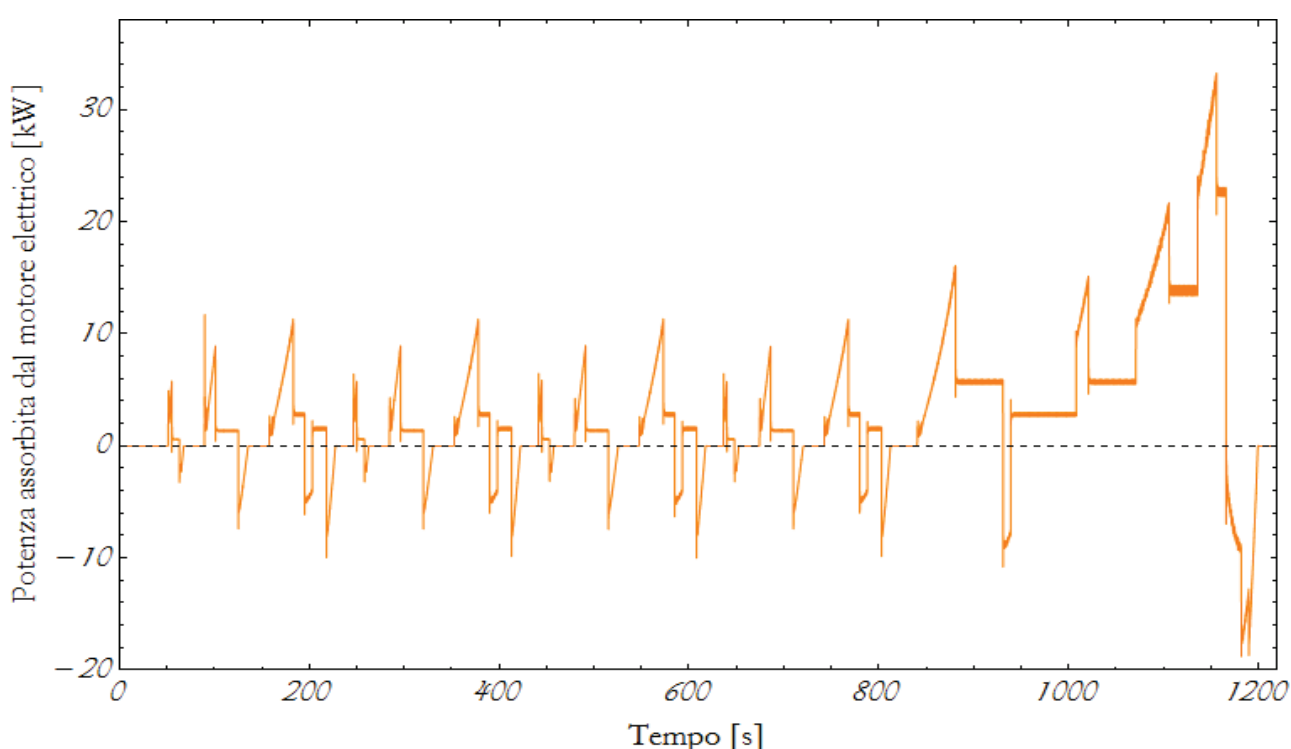


Figura 8.3 Potenza elettrica assorbita dal motore asincrono.

Essendo un ciclo chiuso o comunque definito a priori, conosco esattamente istante per istante il comportamento del motore e la potenza da esso assorbita, questa ipotesi semplificativa di certo non può valere nella realtà dove non posso conoscere a priori la velocità del veicolo.

Analizzando più a fondo la potenza assorbita dal motore elettrico è possibile notare come il tratto urbano del ciclo abbia un peso molto inferiore rispetto al tratto interurbano finale, dove si raggiunge la potenza massima del ciclo pari a 33,3 kW. La potenza media del ciclo risulta essere pari a 2,72 kW.

~ 8.1.1 Dimensionamento del sistema di accumulo in funzione dell'energia recuperabile in frenatura

Come primo approccio al dimensionamento del sistema di accumulo, ipotizzo di dimensionare quest'ultimo con l'obiettivo di accumulare la totalità dell'energia recuperata in frenatura, al netto dei rendimenti in gioco. In questa fase non prendo in considerazione ne le possibili migliorie legate al funzionamento e alla gestione del motore a combustione interna ne tantomeno una sua eventuale ottimalizzazione.

Prendendo in considerazione le medesime condizioni utilizzate nella simulazione di riferimento del veicolo convenzionale, quindi un veicolo di massa pari a 1100 kg , si ottiene un energia totale necessaria per svolgere il ciclo pari a circa 1163,8 Wh.

L'energia totale recuperabile durante il ciclo risulta pari a 241 Wh, che rapportati all'energia totale, rappresentano in termini percentuali il 20,7%.

Osservando con più attenzione la potenza assorbita dal motore elettrico, si nota come nel tratto urbano le frenate abbiano un peso molto ridotto, per di più compensato dalle frequenti accelerazioni (vedi figura 8.3).

Risulta quindi necessario focalizzarsi sul tratto finale, dove il veicolo raggiunge velocità più elevate, per effettuare un dimensionamento del sistema di accumulo.

L'energia recuperata nel tratto finale è pari a 89,9 Wh che corrispondono in termini percentuali al 37 % della totale energia recuperabile durante il ciclo.

I supercondensatori utilizzati per il dimensionamento sono i MAXWELL BMOD0063 P125.

MAXWELL BMOD0063 P125	
Capacità nominale	63 F
Tensione Nominale	125 V
Energia disponibile	101,7 Wh
calcolata come: $\frac{1}{2} C (V_{nom}^2 - (V_{nom}/2)^2) / 3600$	
Peso modulo	60 kg

Tabella 8.1 Caratteristiche principali del supercondensatore utilizzato

Come conseguenza delle ipotesi fatte in precedenza il sistema può essere dimensionato utilizzando un solo modulo. Per avere un maggior margine di sicurezza e per verificare che il dimensionamento sia corretto, ipotizzo di utilizzare un modulo in più, quindi il sistema di accumulo risulterà composto da due moduli.

Definito il numero di moduli, è necessario valutare la variazione di peso del veicolo e della potenza assorbita dal motore elettrico, che intuitivamente porterà ad un aumento di quest'ultima.

Il peso dei moduli, non ottimizzati per un utilizzo in ambito auto motive, è pari a 60 kg (tabella 8.1). E' però ipotizzabile una eventuale ottimizzazione degli ingombri e dei pesi dei moduli e del sistema di raffreddamento, tale da supporre ottimisticamente un peso per modulo pari a 30 kg.

N° Moduli	Peso veicolo [kg]	Inerzia veicolo [kgm ²] (vista dal motore elettrico)
0	1100	9.58
1	1130	9.84
2	1160	10.10

Tabella 8.2 Pesì e inerzie del veicolo

N° moduli	Potenza media del ciclo [W]	Energia totale del ciclo [Wh]	Energia totale recuperata in frenatura [Wh]	Energia recuperata/energia totale %
0	2723	1163,8	241	20,7 %
1	2761	1184,7	249	21 %
2	2799	1205,6	257	21,3 %

Tabella 8.3 Energie in gioco durante il ciclo guida

N° moduli	Energia recuperata in frenatura [Wh]	Energia recuperata nel tratto finale [Wh]	Energia recuperata tratto finale/energia recuperata totale %
0	241	89,9	20,7 %
1	249	93,4	21 %
2	257	97,3	21,3 %

Tabella 8.4 Energia recuperata in frenatura

Come si può vedere dalla tabella 8.3, è possibile aspettarsi un recupero di energia in frenata del 20 %, senza prendere in considerazione i rendimenti del sistema di accumulo e dell'elettronica in gioco.

Considerando un rendimento globale del 80% è lecito aspettarsi un recupero di energia pari al 15-16 % e un conseguente risparmio nel carburante utilizzato dal veicolo.

Per poter verificare se effettivamente il sistema d'accumulo sia coerente con la scelta fatta in precedenza è necessario simulare il veicolo ibrido serie e confrontare i risultati ottenuti in termini di consumo del veicolo stesso.

~ 8.1.2 Verifica del sistema di accumulo

Come visto nel paragrafo precedente è necessario andare a verificare se il sistema di accumulo appena dimensionato sia coerente e porti dei vantaggi nel normale utilizzo del veicolo ibrido.

Risulta altresì necessario introdurre un sistema di controllo del motore termico per poter garantire un corretto funzionamento del veicolo e in particolare del sistema di accumulo.

Il sistema di controllo utilizzato permette al motore di erogare una potenza costante ed eventualmente di spegnere quest'ultimo in caso si raggiunga la tensione nominale del supercondensatore o una tensione di soglia scelta a piacere.

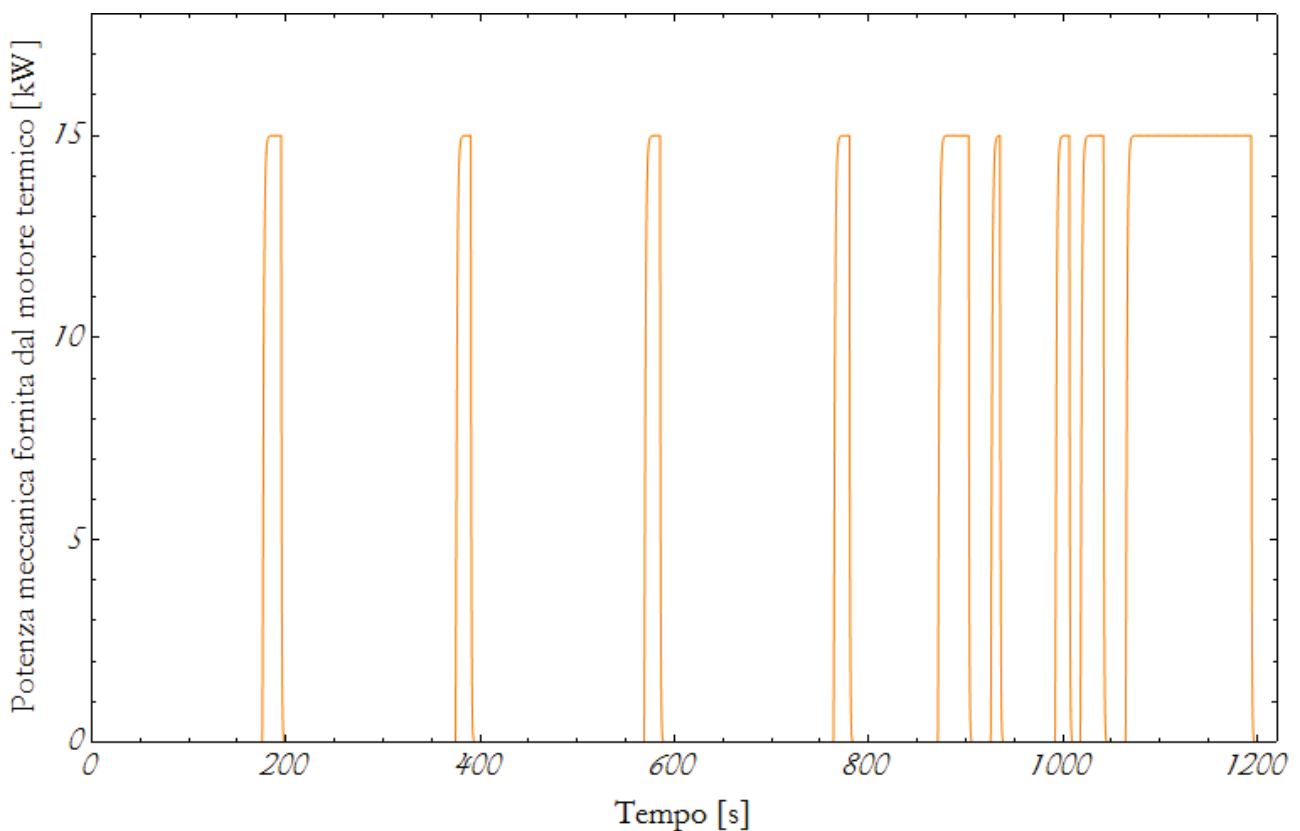


Figura 8.4 Potenza meccanica fornita dal motore termico in caso di 2 moduli

In questo caso il limite di tensione è definito da una doppia soglia pari a 120-110 V.

Per poter correlare le simulazioni e poterne confrontare i risultati, la potenza erogata dal motore termico è scelta facendo riferimento al tratto più gravoso del ciclo guida, ossia il tratto finale.

La potenza erogata è scelta quindi in maniera da limitare la tensione del sistema di accumulo ad un valore minimo pari a circa 40-50 V.

In ultima analisi, ogni simulazione viene effettuata in modo tale da consentire al sistema di accumulo di raggiungere a fine ciclo la tensione che presentava inizialmente (vedi figura successiva).

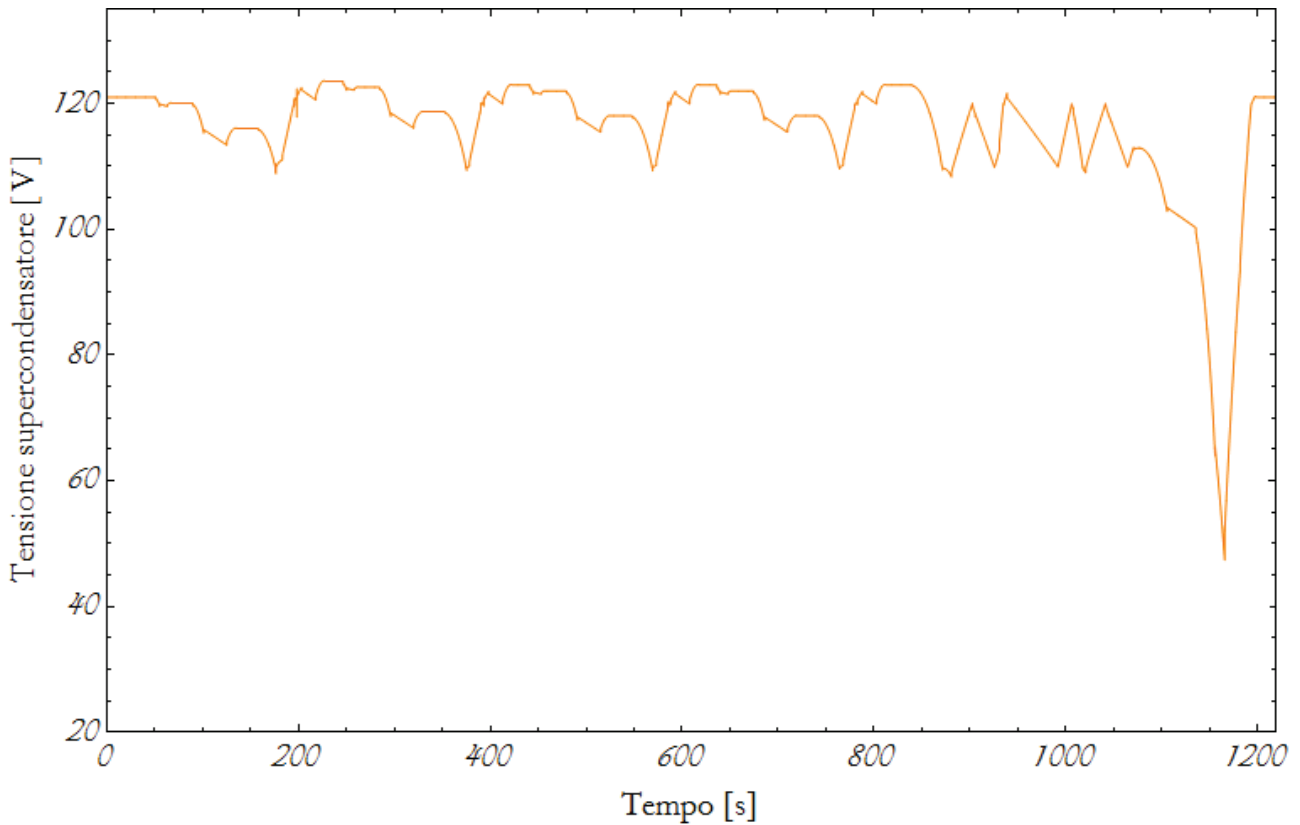


Figura 8.5 Tensione del sistema di accumulo costituito da 2 moduli

Dalla figura 8.5 si evince che l'energia iniziale dei supercondensatori e l'energia finale sono identiche e nel bilancio globale non vi è accumulo di energia. L'energia fornita dal sistema di accumulo al motore elettrico è compensata dall'energia ricavata dalle frenate a recupero, questo ci permette di valutare il risparmio potenziale in termini di consumo del veicolo.

Dal grafico successivo, in cui si riporta la velocità del veicolo e la tensione del sistema di accumulo, si può notare come il tratto di accelerazione finale rappresenti la parte più critica e di maggior stress operativo per il sistema di accumulo.

I supercondensatori infatti sono costretti ad una scarica notevole, passando da una tensione nell'intorno di 110-120 V fino ad una tensione minima di quasi 40-50 V.

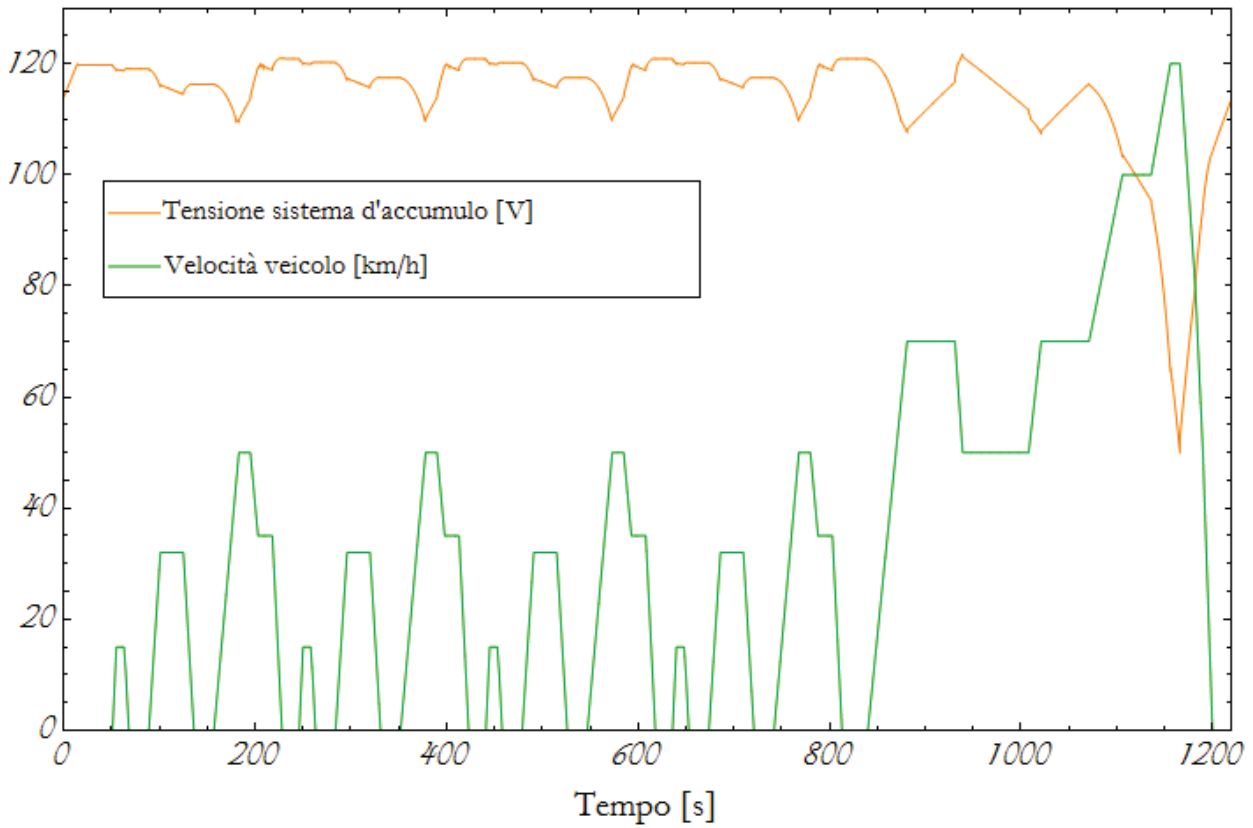


Figura 8.6 Confronto tra tensione del sistema di accumulo e la velocità del veicolo

Le simulazioni portano a dei risultati, in termini di risparmio, congruenti con quanto affermato nel paragrafo precedente.

N° moduli	Coppia motore termico [Nm]	Velocità motore termico [rad/s]	Potenza erogata [kW]	Consumo veicolo [l/100 km]	Risparmio carburante %
0	-	-	-	7,987	0 %
1	100	185	18.5	6,851	14,2 %
2	100	150	15	6,848	14,3 %

Tabella 8.5 Riepilogo risultati delle simulazioni

Dalla tabella 8.5, si può notare come a fronte di un consumo del veicolo di riferimento (con 0 moduli) pari a 7,897 l/100 km, l'introduzione del sistema di accumulo, il consumo si riduca andando a stabilizzarsi intorno a 6,8 l/100 km sia con un modulo che con due.

Questo andamento può essere facilmente presunto dal grafico successivo.

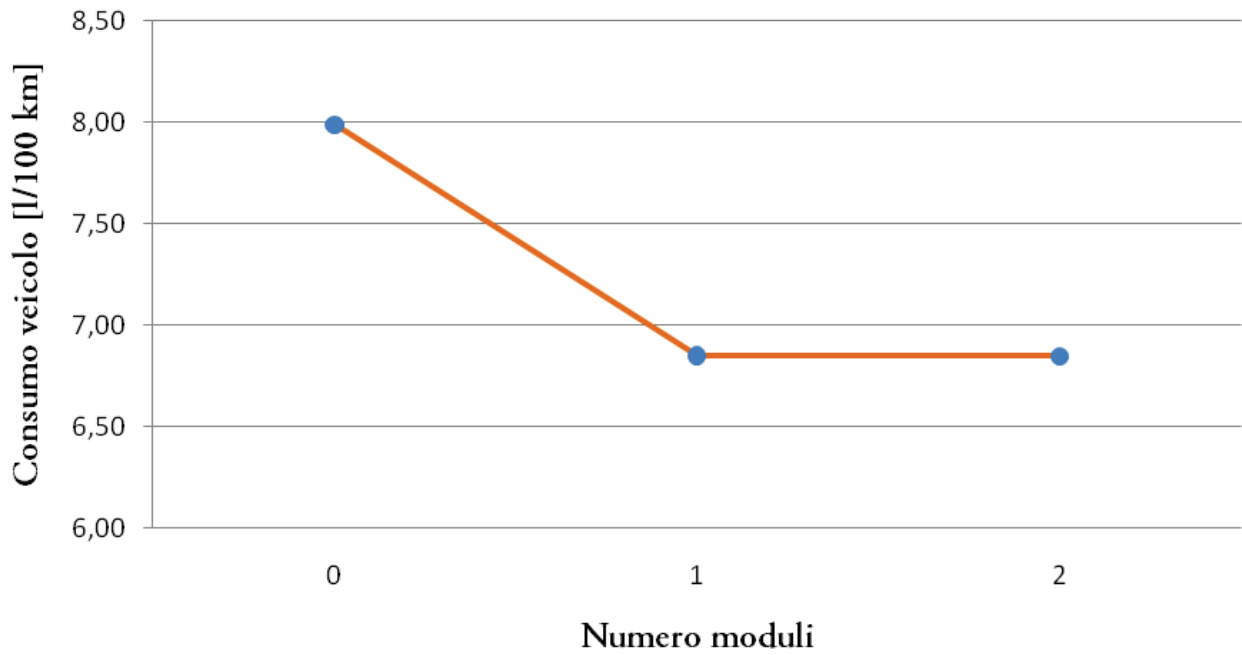


Figura 8.7 Consumo del veicolo in funzione del numero di moduli

In termini di risparmio percentuale si nota come il risparmio con la soluzione a 1 e 2 moduli si stabilizzi intorno al 14-15% ed è facilmente intuibile che rimanga costante anche aumentando il numero di moduli.

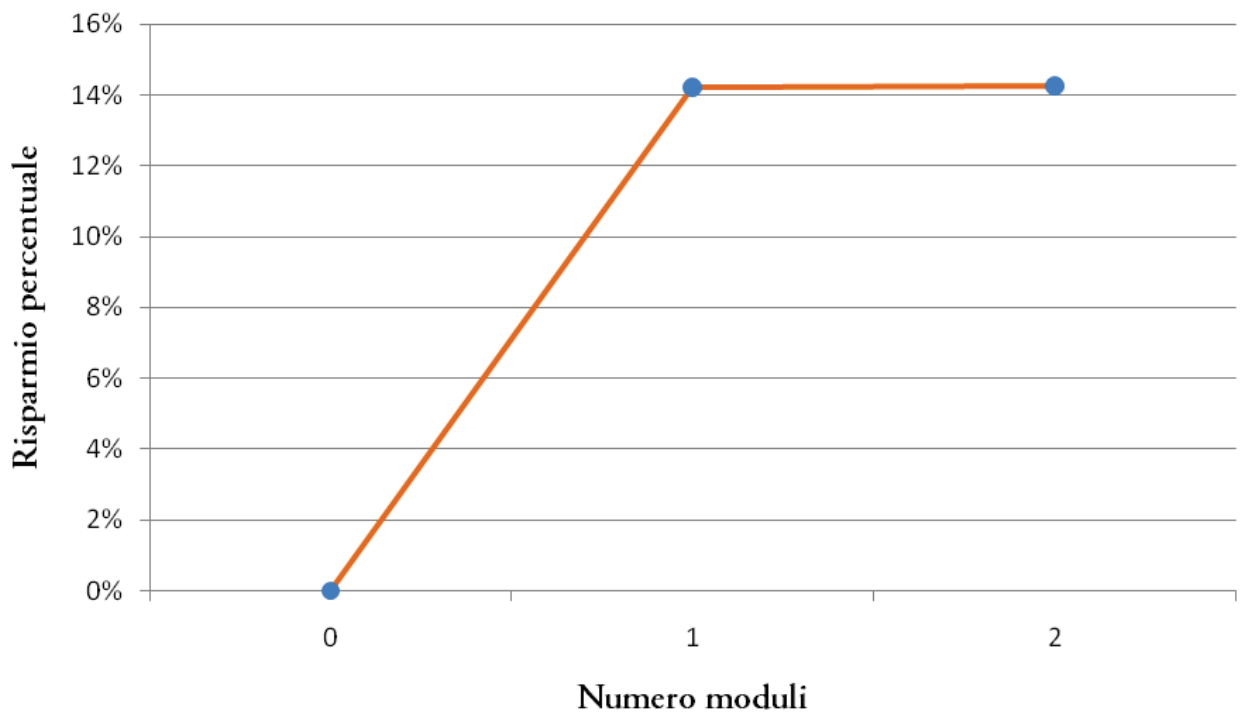


Figura 8.8 Risparmio carburante in funzione del numero di moduli

Il comportamento del sistema conferma ancora una volta come il tratto finale sia decisivo al fine del corretto dimensionamento del sistema di accumulo.

La soluzione di un sistema di accumulo formato da un solo modulo risulta fattibile in termini di ingombri e pesi comportando un aumento di circa 30 kg del peso del veicolo, ai quali però vanno aggiunti anche i pesi relativi al motore elettrico e all'elettronica di potenza.

Il punto dolente della soluzione riguarda il costo del sistema di accumulo, ipotizzando un prezzo all'ingrosso di 4000 €/modulo, soprattutto se il numero di moduli cresce.

Il costo risultante è abbastanza elevato considerando che l'auto scelta per le simulazione è una auto compatta e che nel complesso non vengono considerati i costi legati alle altre apparecchiature elettriche.

Va preso comunque in considerazione che parte dei costi vengono bilanciati da una semplificazione del sistema di trasmissione del veicolo e che in questa serie di simulazioni non si è considerata l'ottimizzazione del motore termico.

D'altra parte l'utilizzo di un singolo modulo, necessità l'implementazione di un sistema di controllo robusto e reattivo, dato che il sistema d'accumulo così dimensionato presenta un margine operativo ridotto che lo può portare facilmente alla saturazione.

Un esempio di tale problema può essere rappresentato dal caso in cui il veicolo sia in frenatura con il sistema di accumulo carico, in queste condizioni e in assenza di un sistema di controllo che eviti la coincidenza di questi due fattori, verrebbe meno l'intento di recuperare l'energia in frenatura anzi andrebbe necessariamente sprecata con conseguente peggioramento dei consumi.

La questione discussa sinora non rappresenta un problema in caso di ciclo guida definito a priori, dove i tempi di frenatura e l'energia recuperata sono noti, ma può essere molto importante in un ciclo aleatorio.

In un ciclo aleatorio, quindi non definito a priori, il sistema di controllo a un ruolo centrale nella gestione del veicolo ibrido, del sistema di accumulo e di riflesso sui consumi del veicolo.

A causa di queste problematiche, la scelta propende per un sistema di accumulo formato da 2 moduli mentre ponendo l'accento sui costi, la scelta ricade su un singolo modulo.

~ 8.1.3 Utilizzo del sistema di Start-Stop

Come visto in precedenza, l'implementazione del sistema di Start-Stop in un veicolo ibrido consente di migliorare ulteriormente l'efficienza di quest'ultimo.

Il sistema di Start-Stop entra in funzione a veicolo fermo spegnendo il motore termico, infatti permette di risparmiare una quota parte di energia che altrimenti andrebbe irrimediabilmente persa.

Come si può osservare dalla figura successiva il risparmio risulta notevole, anche se per esigenze di simulazione la potenza non è effettivamente nulla perché i servizi ausiliari vengono comunque alimentati dal motore termico e non dal sistema di accumulo come nella realtà.

Questa precisazione risulta necessaria perché nella realtà, in caso di spegnimento del motore, la potenza richiesta per gli ausiliari deve essere fornita da un sistema di accumulo a batteria con tutti i problemi che esso comporta. In primis un peggioramento del rendimento del sistema, le problematiche legate al sovradimensionamento della batteria e infine la possibilità di privilegiare alcuni servizi ausiliari rispetto ad altri.

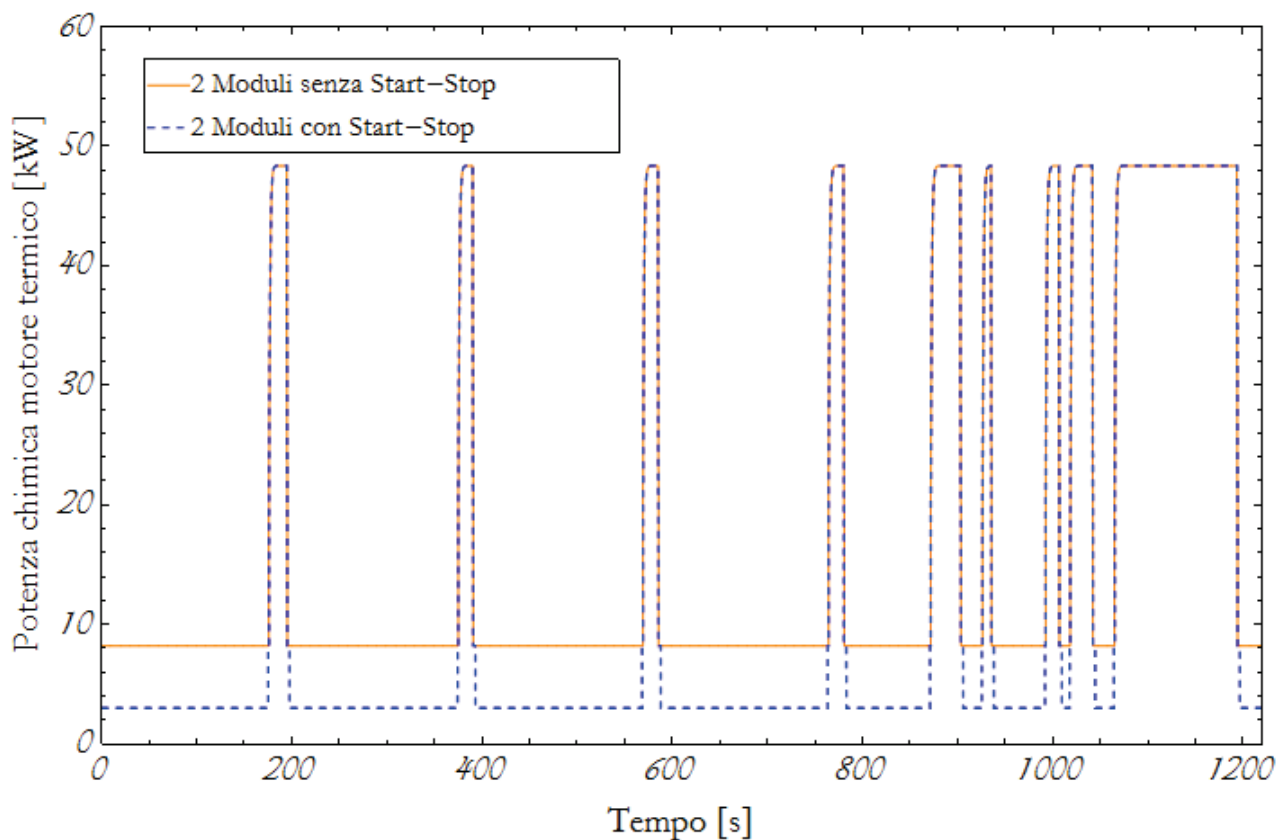


Figura 8.9 Potenza chimica richiesta dal motore con e senza Start-Stop nel caso di 2 moduli

Le simulazioni in questo caso ricalcano esattamente quelle precedenti, lo scopo è di valutare l'impatto del sistema di Start-Stop sui consumi e sull'efficienza del veicolo ibrido.

La tabella successiva riporta i consumi in entrambi i casi al diminuire del numero dei moduli che compongono il sistema d'accumulo.

N° moduli	Coppia motore termico [Nm]	Velocità motore termico [rad/s]	Potenza erogata [kW]	Consumo veicolo senza Start-Stop [l/100 km]	Consumo veicolo con Start-Stop [l/100 km]
0	-	-	-	7,987	6,882
1	100	185	18.5	6,851	5,28
2	100	150	15	6,848	5,274

Tabella 8.6 Consumo veicolo con e senza sistema di Start-Stop

Graficando i risultati per una migliore comprensione si ottiene:

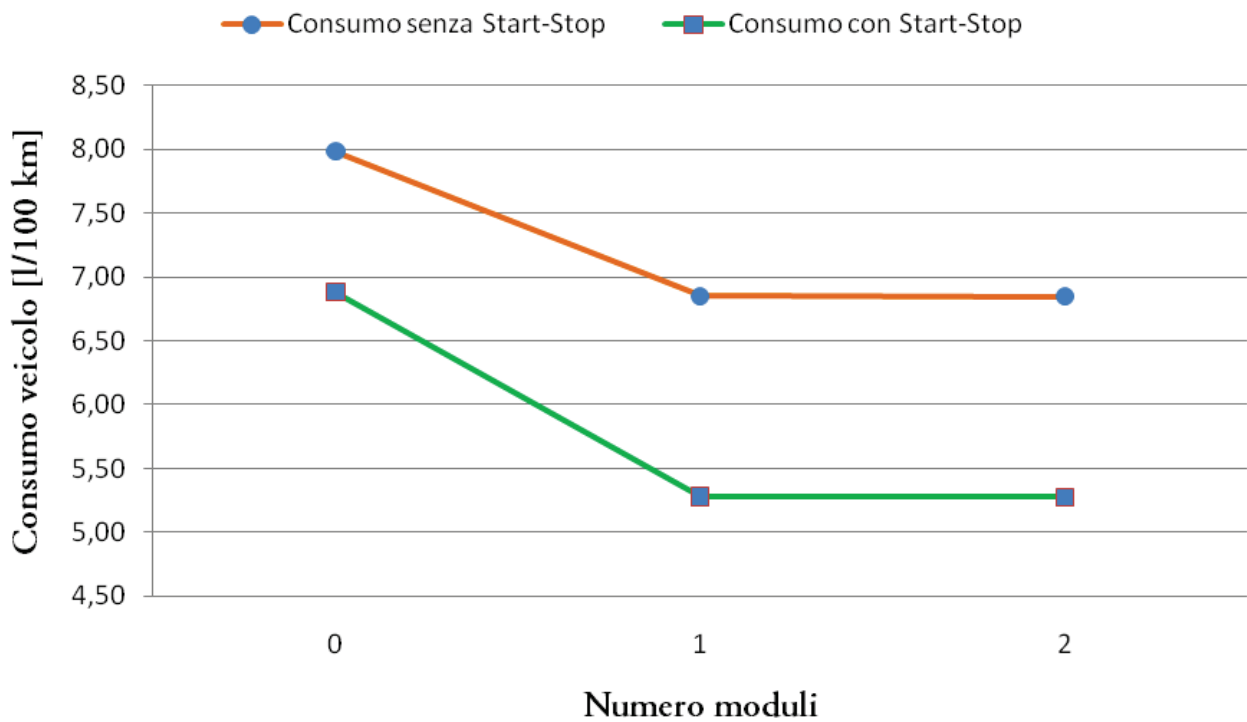


Figura 8.10 Confronto consumi veicolo con e senza Start e Stop

Guardando i risultati si può notare come i consumi del veicolo con il sistema di Start-Stop siano decisamente migliori, addirittura nel caso di veicolo di riferimento il sistema consenta un risparmio di poco inferiore al 14 %.

Tale dato risulta essere in linea con le previsioni per quanto riguarda un ciclo guida caratterizzato da vari periodi in cui il veicolo è completamente fermo.

Il consumo minimo si ottiene nel caso di 2 moduli con circa 5,274 l/100 km pari a 18,96 km/l e un risparmio del carburante pari in termini percentuali a circa il 34 % (vedi tabella sotto).

Da sottolineare come nel caso di 1 e 2 moduli il risparmio dovuto all'utilizzo del sistema di Start-Stop raggiunga il suo massimo pari a circa il 20 %.

N° Moduli	Risparmio carburante % senza sistema Start-Stop	Risparmio carburante % con sistema Start-Stop
0	0 %	13,8 %
1	14,2 %	33,9 %
2	14,3 %	34 %

Tabella 8.7 Confronto risparmio carburante con e senza Start-Stop

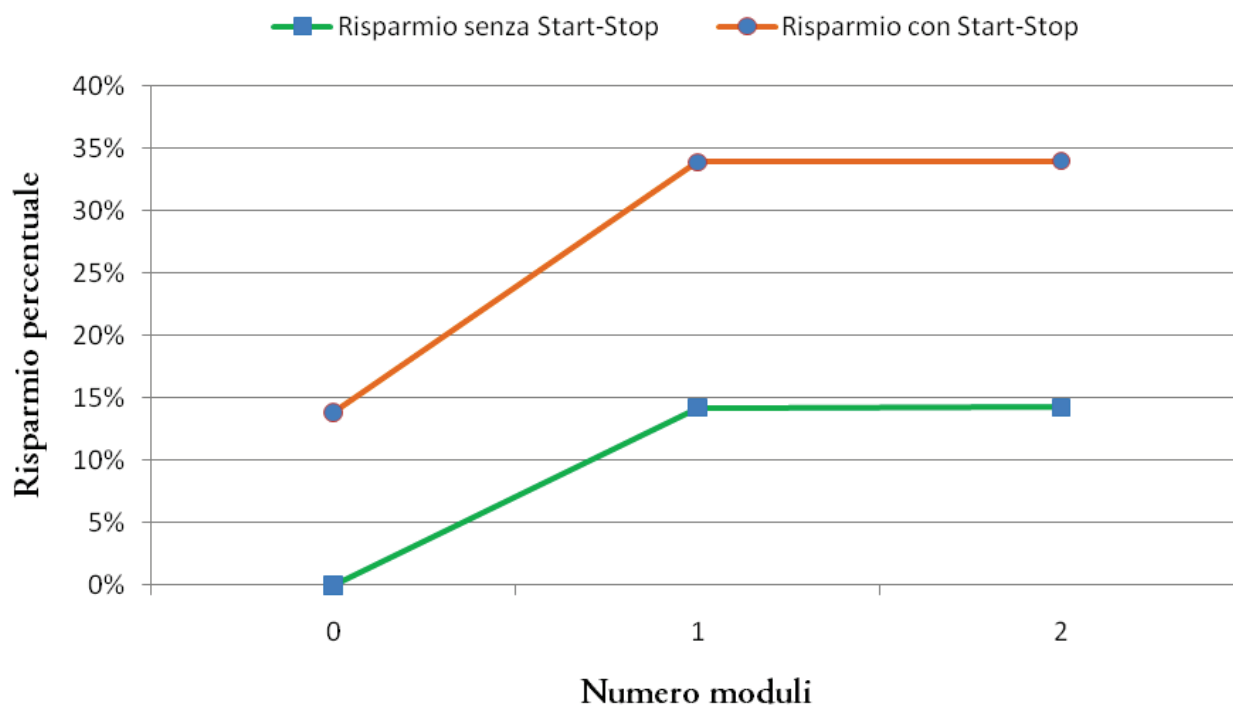


Figura 8.11 Risparmio carburante rispetto al veicolo convenzionale di riferimento

L'implementazione del sistema di Start-Stop permette di ridurre ulteriormente i consumi, andando a raddoppiare il risparmio ottenibile e rendendo pressoché obbligatoria l'implementazione di tale sistema su un veicolo ibrido che fa dell'efficienza il parametro più importante.

~ 8.2 Dimensionamento del sistema di accumulo in funzione dell'ottimizzazione del motore termico

Nel precedente metodo di dimensionamento si è privilegiata la possibilità di poter accumulare tutta l'energia recuperata in frenatura, senza occuparsi del motore a combustione ne del suo funzionamento.

Le simulazioni hanno dimostrato che è sufficiente utilizzare un numero limitato di moduli per ottenere l'effetto desiderato.

In questo nuovo approccio risulta necessario disporre di un numero di moduli maggiore che permetta al sistema di accumulo di espletare la funzione di serbatoio, consentendo al motore a combustione interna di ottimizzare il proprio funzionamento e permettendo a quest'ultimo di funzionare a rendimenti più elevati.

L'approccio utilizzato consente inoltre di sottodimensionare il motore termico consentendo un risparmio sia in termini di ingombro che in termini economici.

Il sottodimensionamento del motore, in questa serie di simulazioni, consiste essenzialmente nella riduzione della cilindrata al fine di consentire al motore termico di lavorare ad un rendimento pari a circa il 33%.

La modalità di controllo non cambia rispetto alla situazione precedente, con un controllo di tipo on/off (o termostatico) del motore in fase di erogazione della potenza meccanica all'albero.

Per meglio comprendere come la riduzione di cilindrata agisca sul rendimento del motore, si prenda in considerazione le due immagini seguenti.

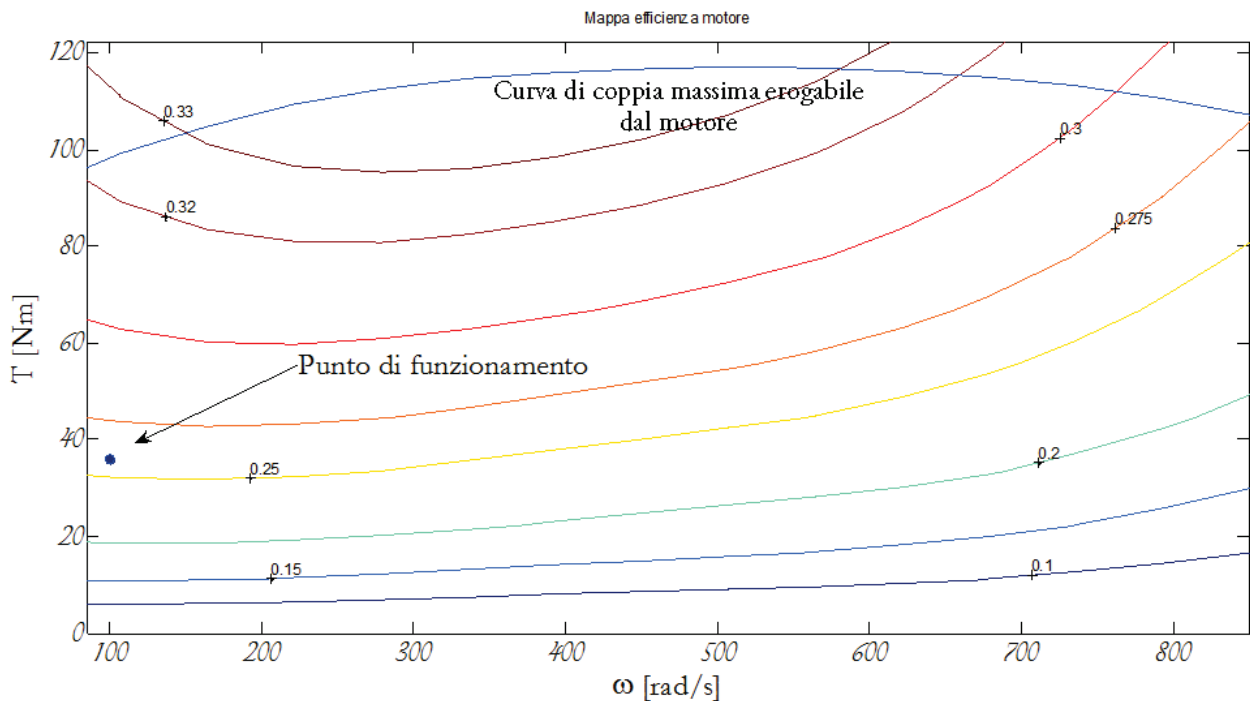


Figura 8.12 Mappa d'efficienza del motore termico di cilindrata pari a 1398 cm³

Prendendo in considerazione un esempio, il motore termico deve funzionare a potenza costante pari a 3,6 kW. Impostando una coppia di 36 Nm e una velocità angolare di 100 rad/s, si ottiene un punto di funzionamento con rendimento di poco superiore al 25 %.

Per raggiungere un punto di funzionamento caratterizzato da un rendimento migliore sarà necessario ridurre la cilindrata, in maniera tale da accorciare la mappa d'efficienza lungo l'asse delle ordinate, come si può ben vedere in figura 8.13.

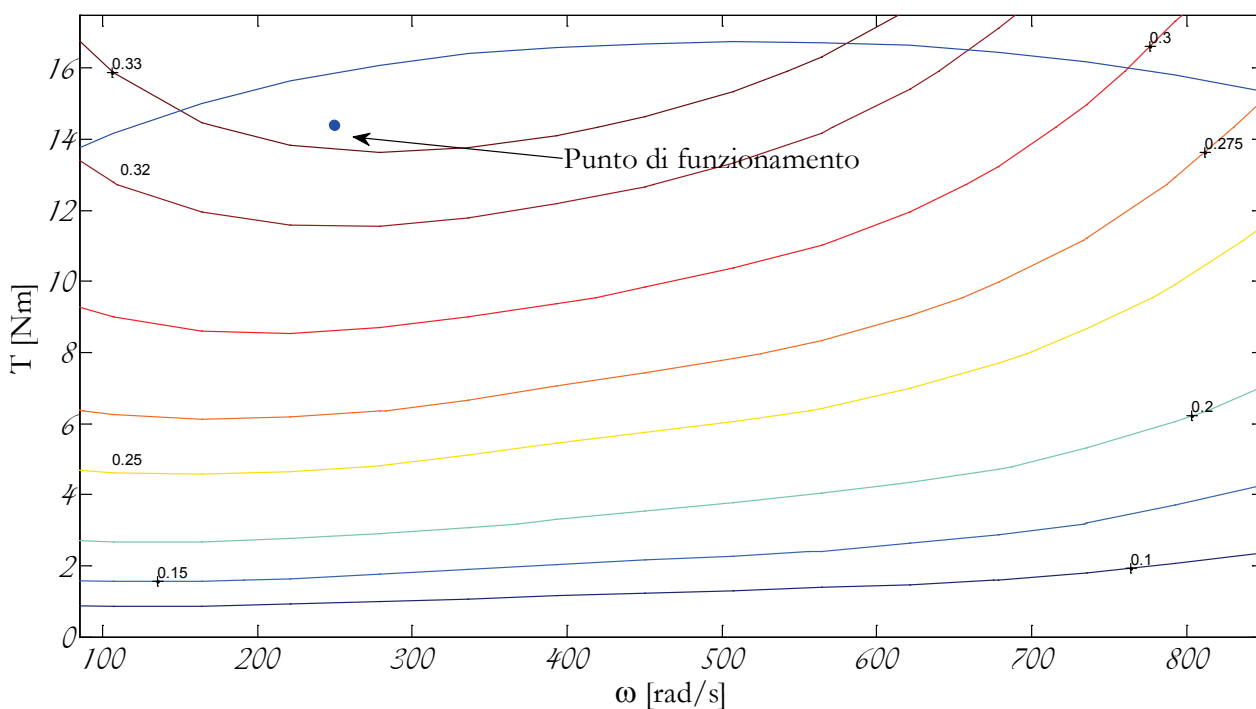


Figura 8.13 Mappa d'efficienza del motore termico di cilindrata pari a 200 cm³

In questo caso la cilindrata viene ridotta a 200 cm³ cioè circa un settimo della cilindrata di partenza.

Il punto di funzionamento a 250 rad/s e 14,4 Nm presenta un rendimento pari a circa il 33 %, rappresentando il massimo ottenibile dall'ottimizzazione del motore a combustione preso in considerazione.

L'ottimizzazione del motore ci consente di portare agli estremi l'efficienza e il risparmio ottenibili, permettendoci inoltre di definire l'estremo massimo di ottimizzazione.

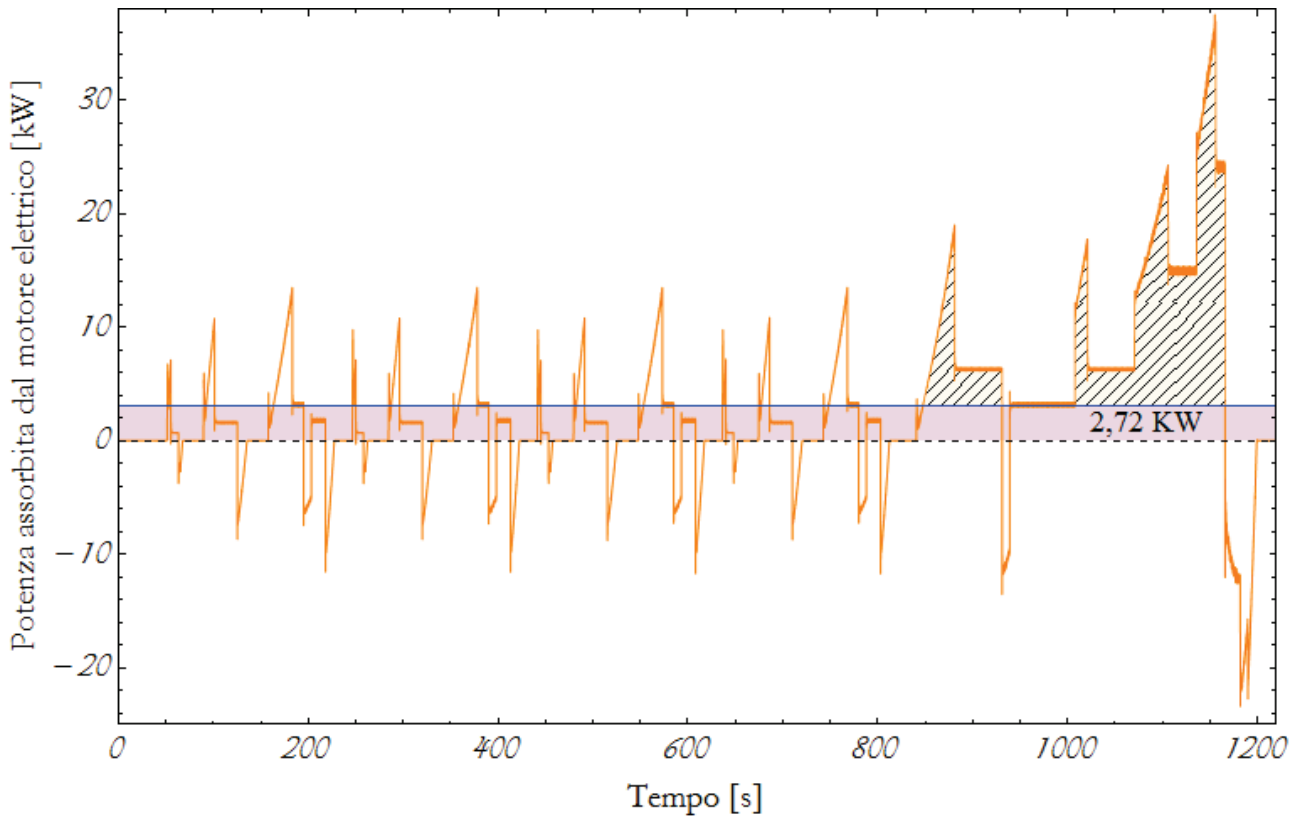


Figura 8.14 Potenza assorbita dal motore elettrico e la sua media.

Come approccio al dimensionamento del sistema di accumulo, ipotizzo che il motore termico fornisca la potenza media del ciclo, mentre il sistema di accumulo fornisca la parte dinamica ovvero variabile della potenza.

La funzione del sistema di accumulo ricalca in tutto e per tutto quella di “peak shaving”, ossia consente di eliminare i picchi nella potenza richiesta dal motore elettrico, permettendo al motore a combustione di funzionare a potenza costante e ottimizzare il suo funzionamento.

Come visto in precedenza, il tratto finale del ciclo di guida è senz’altro decisivo ai fini del dimensionamento del sistema di accumulo soprattutto in un’ottica di ottimizzazione del motore.

Il sistema di accumulo pertanto deve essere dimensionato in funzione dell’energia assorbita dal motore nel tratto finale meno la potenza media fornita dal motore termico, come si può ben vedere dall’area tratteggiata in figura 8.14.

Prendendo in considerazione le medesime condizioni utilizzate nella simulazione del veicolo convenzionale, quindi un veicolo di massa pari a 1100 kg, si ottiene un’energia totale del ciclo pari a circa 1164 Wh.

L’energia necessaria a coprire il tratto finale del ciclo, risulta invece essere pari a circa 585,2 Wh, mentre l’energia totale recuperabile grazie alla frenatura a recupero, facente riferimento alla somma delle aree negative della potenza richiesta dal motore elettrico, è pari a circa 241 Wh.

A questo punto per valutare correttamente la potenza assorbita dal motore elettrico, va considerato il peso aggiuntivo del sistema di accumulo, portando ad un aumento della potenza richiesta.

N° Moduli	Peso veicolo [kg]	Inerzia veicolo [kgm^2] (vista dal motore elettrico)
7	1310	11.41
6	1280	11.15
5	1250	10.89
4	1220	10.63
3	1190	10.37
2	1160	10.10
1	1130	9.84
0	1100	9.58

Tabella 8.8 Pesì e inerzie del veicolo

N° moduli	Potenza media del ciclo [W]	Energia media ciclo [Wh]	Energia tratto finale [Wh]
0	2723	922,8	585,2
1	2761	935,7	594
2	2799	948,6	602,9
3	2836	961,1	611,7
4	2874	974	620,6
5	2912	986,8	629,5
6	2950	999,7	638,3
7	2998	1016	648

Tabella 8.9 Potenze ed energie del ciclo in funzione del numero di moduli

Se nel dimensionamento del sistema di accumulo, non si considera il peso dei moduli e la necessaria correzione dell'energia richiesta dal veicolo, si ottiene che per 585,2 Wh sono necessari 6 moduli da 101,7 Wh. Con i dovuti correttivi il sistema di accumulo deve necessariamente ampliarsi con l'aggiunta di un altro modulo, arrotondando per eccesso risulta infatti che per coprire 648 Wh di energia sono necessari 7 moduli. Come si può vedere dalla tabella seguente, l'energia recuperabile durante la frenatura a recupero rappresenta all'incirca il 21-23 % dell'energia totale del ciclo guida.

N°Modulo	Energia media del ciclo [Wh]	Energia totale recuperata in frenatura [Wh]	Energia totale del ciclo [Wh]	Energia recuperata/energia totale %
0	922,8	241	1163,8	20,7 %
1	935,7	249	1184,7	21 %
2	948,6	257	1205,6	21,3 %
3	961,1	265,2	1226,3	21,6 %
4	974	273,6	1247,6	21,9 %
5	986,8	281,6	1268,4	22,2 %
6	999,7	289,7	1289,4	22,4 %
7	1016	297	1313	22,6 %

Tabella 8.10 Energie in gioco nel ciclo guida

In questa simulazione il motore termico fornirà inizialmente una potenza costante pari alla potenza media del ciclo, corretta tenendo conto dei rendimenti in gioco, mentre il sistema di accumulo, composto da sette moduli, fornirà la potenza mancante.

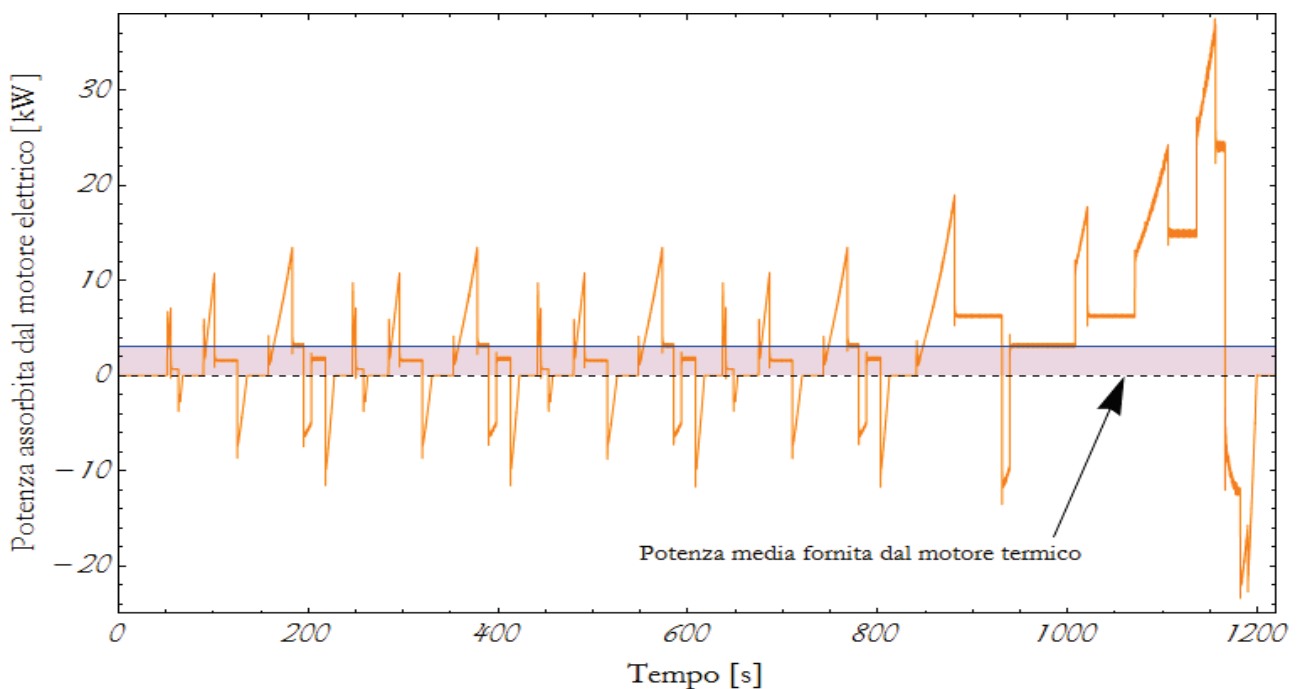


Figura 8.15 Potenza assorbita dal motore elettrico con sistema di accumulo a 7 moduli

La potenza media del ciclo in riferimento al grafico precedente è pari a 2998 W, tenendo conto di un rendimento del gruppo generatore-raddrizzatore pari all'85 % si ottiene una potenza di circa 3600 W. Tale valore rappresenta la potenza che il motore termico dovrà erogare per ottenere a valle del raddrizzatore circa 3 kW.

I supercondensatori, nella simulazione in esame non sono completamente scarichi, ma anzi presentano una tensione iniziale pari a 75 V. Questo consente di far lavorare il sistema di accumulo nella zona di funzionamento ottimo.

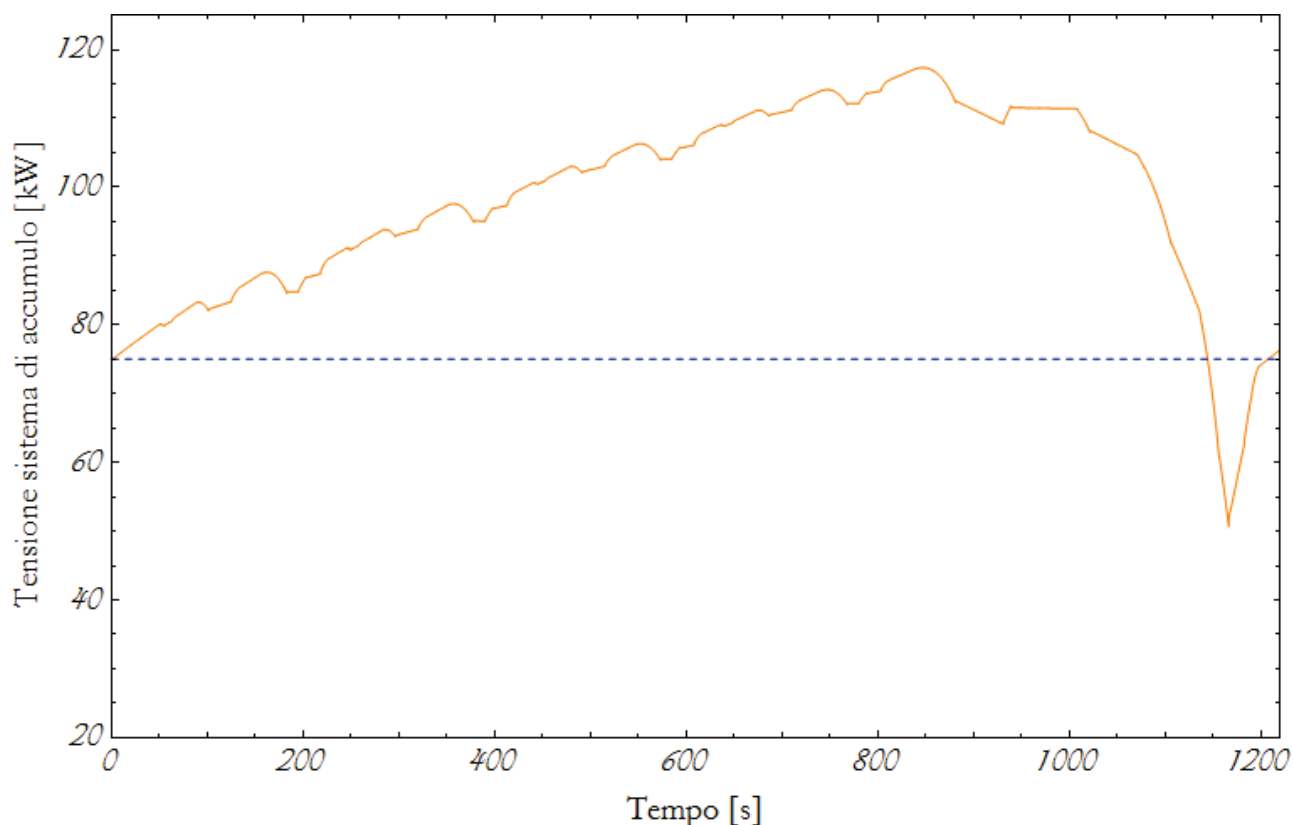


Figura 8.16 Tensione del sistema di accumulo costituito da 7 moduli

Risulta chiaro che per garantire un funzionamento a potenza costante del motore termico, per tutta la durata del ciclo guida, è necessario un sistema di accumulo mastodontico sia per peso che per ingombro.

Co me conseguenza è necessario ridurre il sistema di accumulo, sacrificando il funzionamento a potenza costante del motore che non potrà più mantenere per tutta la durata del ciclo guida ed aumentando contemporaneamente la potenza erogata dal motore.

N° moduli	Coppia motore termico [Nm]	Velocità motore termico [rad/s]	Potenza erogata [kW]	Cilindrata [cm ³]	Consumo veicolo senza Start-Stop [l/100 km]	Consumo veicolo con Start-Stop [l/100 km]
0	-	-	-	1398	7,987	6,882
1	74	250	18,5	950	6,398	5,311
2	60	250	15	800	6,059	5,146
3	44	250	11	600	5,795	5,177
4	28	250	7	380	5,544	5,248
5	24,8	250	6,2	325	5,512	5,292
6	18,6	250	4,65	250	5,557	5,471
7	14,4	250	3,6	200	5,603	5,603

Tabella 8.11 Consumi veicolo con motore termico ottimizzato

La tabella riassuntiva precedente riporta i consumi a seguito dell'ottimizzazione del motore a combustione interna sia nel caso di sistema di Start-Stop sia disattivato che nel caso in cui sia attivo.

Rappresentando graficamente i risultati e confrontandoli si ottiene:

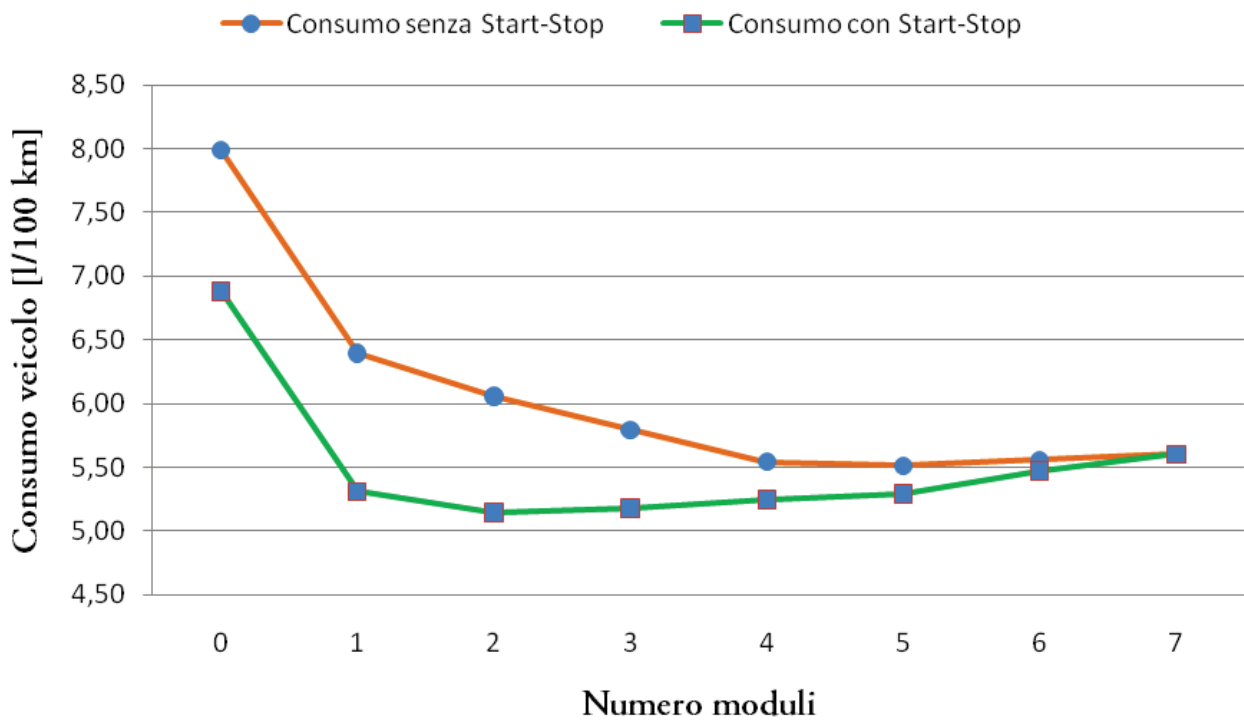


Figura 8.17 Consumi del veicolo ibrido con motore ottimizzato

Dalla figura 8.17 si può notare come il consumo in assenza di Start-Stop risulti rimanere abbastanza costante fino a 4 moduli con un leggero calo imputabile a degli errori di simulazione.

Questo comportamento è facilmente spiegabile tenendo in considerazione che l'ottimizzazione del motore per moduli che vanno da 7 a 4 è simile dato che la cilindrata varia limitatamente tra 200 cm³ e i 380 cm³ e che la potenza stessa erogata dal motore si limiti a raddoppiare passando da 7 a 4 moduli. Il risultato finale è che i consumi tendono a rimanere costanti al variare dei moduli.

L'efficienza guadagnata con tale operazione tende a ridursi vistosamente dal 3 modulo in poi, dato che le potenze erogate dal motore tendono a crescere in maniera elevata.

Il risparmio massimo ottenibile in questo caso è pari a circa il 31%.

Le considerazioni effettuate precedentemente valgono anche in caso di utilizzo del sistema di Start-Stop; va però tenuto presente che il consumo tende a diminuire dal caso di 6 moduli perché in funzionamento del motore non è più a potenza costante.

Al ridursi dei moduli il motore presenta un funzionamento a potenza sempre più elevata ma per periodi di tempo sempre più ridotti. Aumentando i periodi in cui il motore non eroga potenza, aumentano di conseguenza i periodi in cui il sistema di Start-Stop entra in funzione spegnendo il motore termico e azzerando i consumi.

Riepilogando il risparmio nei vari casi si ottiene:

N° Moduli	Risparmio carburante % senza sistema Start-Stop	Risparmio carburante % con sistema Start-Stop
7	29,8 %	29,8 %
6	30,4 %	31,5 %
5	31%	33,7 %
4	30,6 %	34,3 %
3	27,4 %	35,2 %
2	24,1 %	35,6 %
1	19,9 %	33,5 %

Tabella 8.12 Confronto risparmio carburante del veicolo con motore termico ottimizzato (con e senza Start-Stop)

Come accennato in precedenza, risulta chiaro che per una vettura compatta, un sistema di accumulo che contempli l'utilizzo di ben sette moduli rappresenta una soluzione irrealizzabile sia per l'ingombro sia per i relativi pesi.

Non meno importante risulta poi il costo legato al sistema di accumulo e alla sua implementazione, tralasciando i costi relativi alla macchine elettriche e all'elettronica di potenza, focalizzandosi solo sul sistema di accumulo e ipotizzando come nei paragrafi precedenti un prezzo all'ingrosso di 4000 €/modulo, si ottiene l'esorbitante costo di 28.000 € per il solo sistema di accumulo.

Tale costo supera abbondantemente il prezzo della sola vettura risultando quindi una soluzione impraticabile. Fortunatamente un sistema di tali proporzioni risulta, a margine delle simulazioni, inutile, dato che un ottimo risparmio è ottenibile con 2 e 3 moduli in assenza di Start-Stop.

Con l'ausilio del sistema di Start e Stop, un sistema composto da due moduli rappresenta la soluzione che consente il massimo risparmio.

Va preso in considerazione che l'analisi e la ricerca di una soluzione di ottimo tecnico economico esulano dagli obiettivi preposti della tesi.

9 Conclusion

Nella tesi si è effettuato lo studio di fattibilità di un sistema di accumulo a supercondensatori, da introdurre in un veicolo ibrido serie al fine di ridurre i consumi.

I risultati ottenuti sono facilmente estendibili a tutte le altre categorie di veicolo ibrido non prese in considerazione.

Le simulazioni effettuate ci consentono di affermare che un sistema di accumulo a supercondensatori è realizzabile dal punto di vista tecnico.

L'analisi condotta, pone in evidenza come, il numero di moduli necessari per incrementare l'efficienza del veicolo attuando il recupero in frenatura e/o ottimizzando il funzionamento del motore termico è abbastanza contenuto.

Ne consegue un numero di moduli pari a due, se si privilegia il risparmio massimo pari a circa il 35%, oppure di un singolo modulo se si propende a minimizzare il costo della soluzione; chiarendo che è necessaria un'accurata analisi di ottimo tecnico-economico che esula dal lavoro effettuato.

Non è necessario quindi introdurre onerosi sistemi di accumulo o utilizzare tecnologie d'accumulo differenti come le batterie al litio per poter ridurre i consumi di un veicolo.

Queste conclusioni sono vere se l'obiettivo ultimo del veicolo ibrido è quello di risparmiare sui consumi, se ci poniamo un obiettivo differente le conclusioni possono variare di volta in volta.

Per esempio se focalizziamo l'attenzione sulle prestazioni del veicolo, come molte blasonate case automobilistiche stanno facendo, il sistema di accumulo richiesto risulterà sicuramente sovradimensionato per garantire le prestazioni richieste mentre i risultati legati al risparmio sono senz'altro secondari rispetto all'obiettivo di partenza.

Altro possibile esempio è quello di garantire il funzionamento solo elettrico di questi veicoli per lunghe percorrenze, portando come conseguenza quella di sovradimensionare il sistema di accumulo.

Queste scelte in fase di dimensionamento poi si riflettono direttamente sul controllo del sistema di trazione del veicolo ibrido e anche sulle apparecchiature elettriche utilizzate, in particolare sui motori e sull'elettronica di potenza.

I primi risultati conseguiti sono incoraggianti e costituiscono il punto di partenza per ulteriori approfondimenti di tipo tecnico-economico sui sistemi di controllo adottabili e sull'ottimizzazione del funzionamento del motore termico.

Appendice

~ Dinamica longitudinale del veicolo

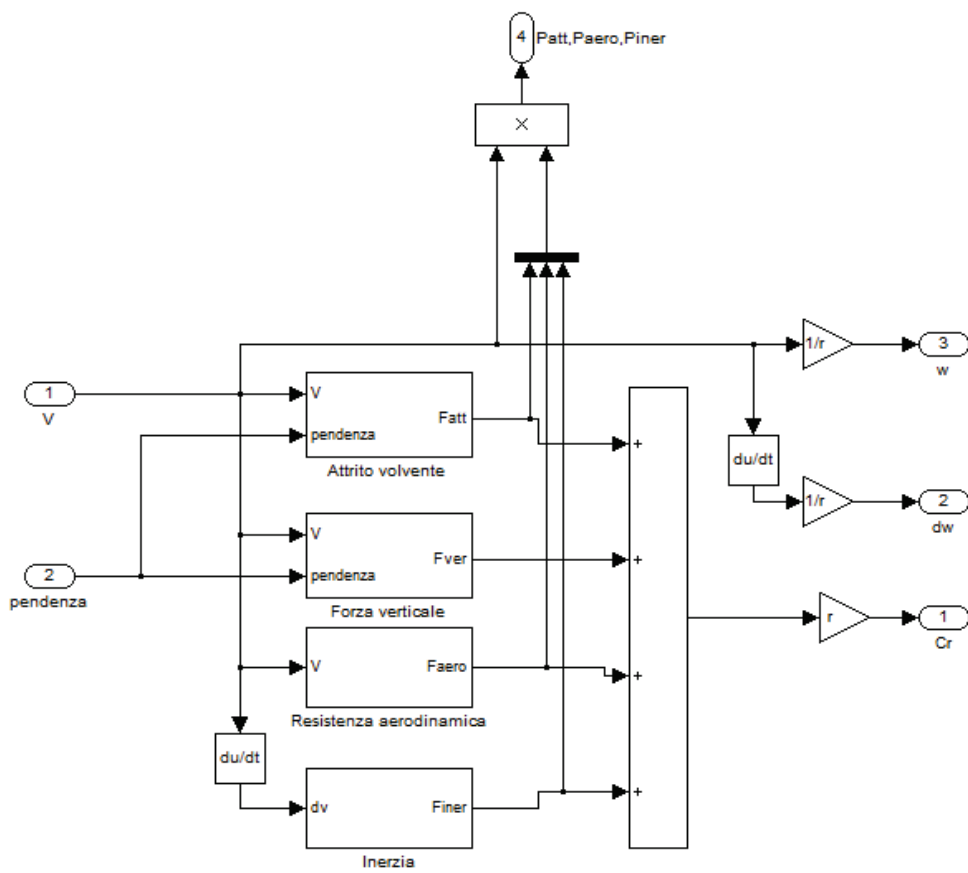


Figura 1 Schema Matlab della dinamica longitudinale del veicolo

Parametri	Valore
Massa del veicolo [Kg]	1100
Accelerazione gravitazionale [m/s ²]	9,81
Pressione dei pneumatici [psi]	31,9
Densità dell'aria [Kg/m ³]	1,18
Coefficiente aerodinamico	0,33
Area frontale del veicolo [m ²]	2,08
Massa rotante [%]	7
Raggio ruota [m]	0,35

Tabella 1 Parametri utilizzati nel modello del veicolo

Per le simulazioni relative al veicolo ibrido, la massa del veicolo varia in funzione del numero di moduli utilizzato nel sistema di accumulo. Inoltre la massa rotante non viene presa in considerazione perché il contributo dell'inerzia è modellizzato all'interno del motore elettrico.

~ Trasmissione manuale

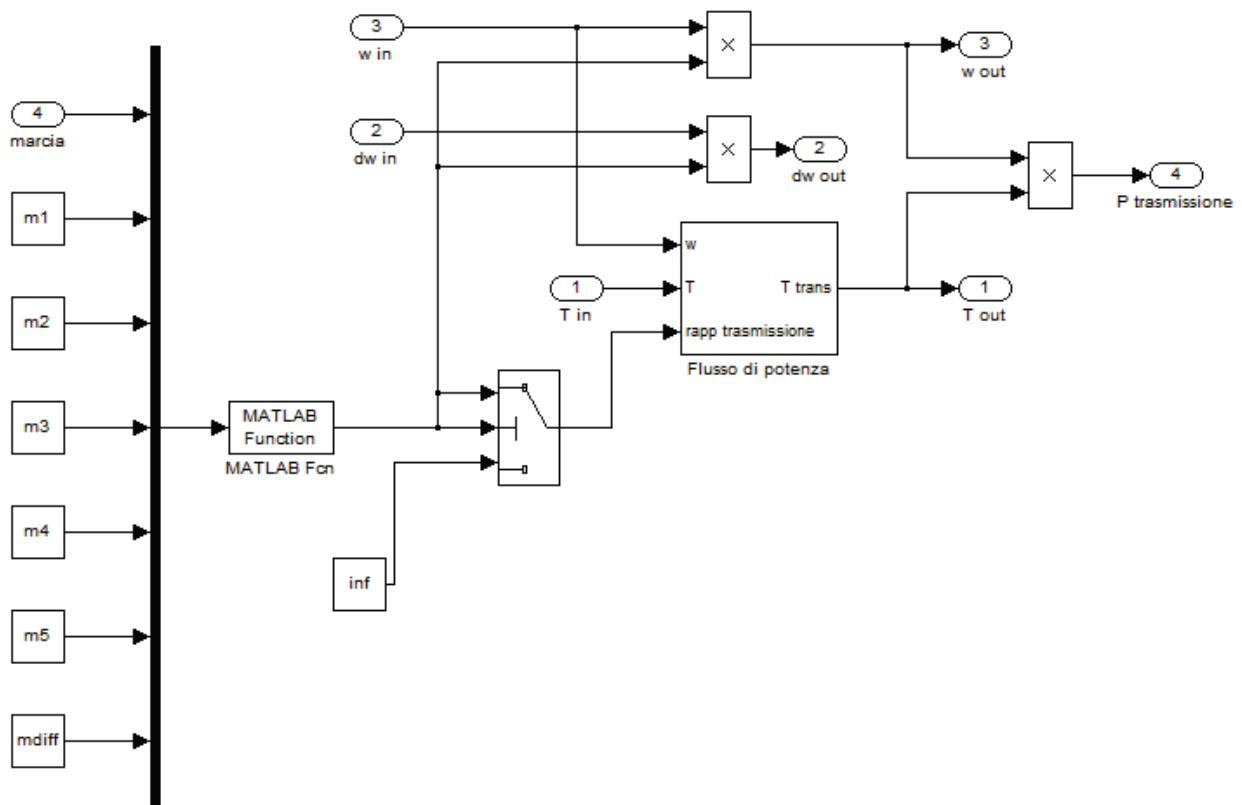


Figura 2 Schema Matlab della trasmissione manuale

Parametri	Valore
Efficienza	0,98
Perdite per attrito [W]	300
Velocità minima al di sotto della quale le perdite sono effettive [rad/s]	1
1° Rapporto	2,82
2° Rapporto	1,508
3° Rapporto	1,41
4° Rapporto	1,11
5° Rapporto	0,88

Tabella 2 Parametri utilizzati nel modello della trasmissione

Listato del programma Matlab per la gestione delle marcie:

```
function [rap] = cambioman(u)

switch u(1)
case 0
    rap = 0;
case 1
    rap = u(2);
case 2
    rap = u(3);
case 3
    rap = u(4);
case 4
    rap = u(5);
case 5
    rap = u(6);
otherwise
    disp('errore');
end

rap = rap*u(7);
```

La trasmissione semplice utilizzata nel veicolo ibrido, ricalca in tutto e per tutto il modello qui sopra, senza la presenza dei vari rapporti ma con un solo rapporto fisso pari a 3,75 e le perdite ridotte a 50 W.

~ Motore a combustione a benzina

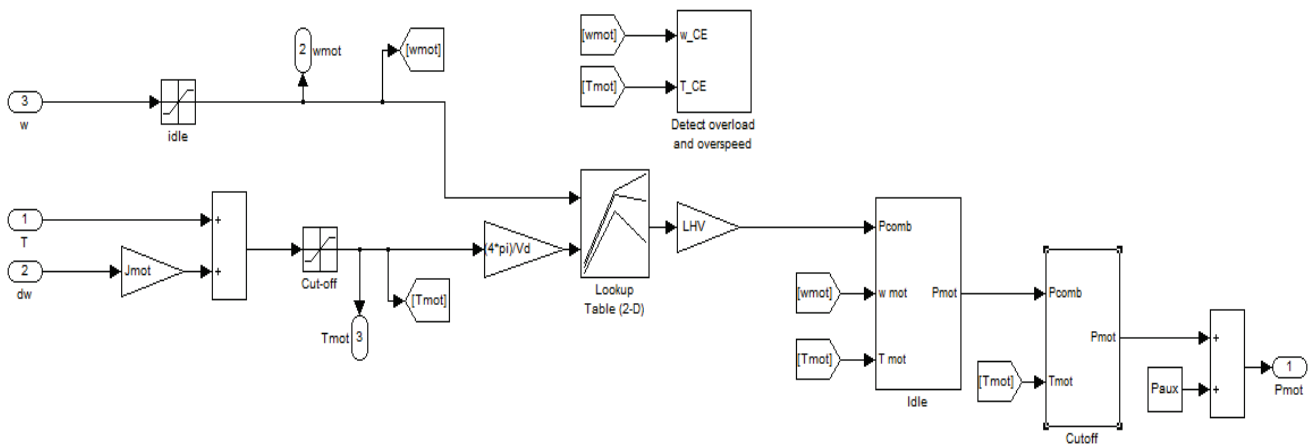


Figura 3 Modello Matlab del motore a combustione

Parametri	Valore
Cilindrata [m ³]	1,398/1000
Inerzia del motore [Kg*m ²]	0,05
Velocità del motore a vuoto [rad/s]	85
Potenza del motore a vuoto [W]	5200
Potenza ausiliari [W]	3000
Potere calorifico inferiore [J/Kg]	42,7*10 ⁶
Coppia di Cut-Off [Nm]	5
Velocità di Cut-Off [rad/s]	0

Tabella 3 Parametri utilizzati nel modello del motore termico

~ Motore asincrono trifase

Parametri	Valore
Lm [H]	0,06
Lr [H]	0.000724
Ls [H]	0.000724
Rr [Ω]	0.08233
Rs [Ω]	0.0503
N° poli	2
Inerzia [Nm]	9,84
Io [A]	30

Tabella 4 Parametri utilizzati nel modello del motore elettrico

Per le simulazioni relative al veicolo ibrido, l'inerzia varia in funzione del numero di moduli utilizzato nel sistema di accumulo.

~ Supercondensatore

Parametri	Valore
Numero di moduli in serie	1
Numero di moduli in parallelo	1
Tensione iniziale [V]	70

Tabella 5 Parametri utilizzati nel modello del supercondensatore

Parametri d'inizializzazione del supercondensatore:

```
%% parametri di un modulo HTM 125
```

```
a=0.51;           %è tao_0  
b=0.000632;      %è tao_(V)  
c=42.4;          %è C_0  
d=0.159;         %è C(V)  
R=14e-3;         %è Ri  
R2=216;  
C2=2.313;  
Rleak=24000;  
R0=18e-3;
```

```
%Supercap
```

```
c=c/NS*NP;       %è C_0  
d=d/NS^2*NP;     %è C(V)  
R=R*NS/NP;       %è Ri  
R0=R0*NS/NP  
a=(R0-R)*c*3;    %è tao_0  
b=(R0-R)*d*3;    %è tao_(V)
```

```
Vi=Vi*NS;  
R2=R2*NS/NP;  
C2=C2/NS*NP;  
Rleak=Rleak*NS/NP;
```

Ringraziamenti

Giunto al termine di questo lavoro desidero ringraziare ed esprimere la mia riconoscenza nei confronti di tutte le persone che, in modi diversi, mi sono state vicine e hanno permesso e incoraggiato sia i miei studi che la realizzazione e stesura di questa tesi.

I miei più sentiti ringraziamenti vanno a chi mi ha seguito durante la redazione del lavoro di tesi, in particolare al Chiar.mo Prof. Ing. Enrico Tironi per la continua disponibilità e prontezza nei chiarimenti e suggerimenti e per la rilettura critica di tutti i capitoli della tesi.

All'Ing. Vincenzo Musolino per la fiducia fin da subito dimostratami nell'aver accettato questo argomento di tesi e per avermi seguito durante lo svolgimento del lavoro con consigli e confronti che mi hanno aiutato ad intraprendere, ogni volta, le scelte più appropriate.

Al Ing. Luigi Piegari per avermi prestato più volte ascolto durante questo lavoro di tesi, per la sua chiarezza nell'avermi fornito molteplici opinioni e strumenti di lavoro nonché per i caffè offerti, che in qualche modo dovrò contraccambiare.

Rimarrà in me il piacevole ricordo di questi 5 anni di studio che ho trascorso “a tempo pieno” in questo dipartimento e per aver trovato quasi sempre professori disponibili al dialogo e a confrontarsi con le idee altrui, qualità non da tutti. In modo particolare desidero ringraziare quei docenti che hanno contribuito, con consigli e suggerimenti, al raggiungimento di questo traguardo, per me importante.

Per ultimo, ma di certo non per importanza, ringrazio la mia famiglia che mi è stata molto vicina in tutti questi anni “da studente”, che oltre ad avermi sempre “supportato” mi hanno più di tutto “sopportato”. Il mio primo pensiero, ovviamente, va ai miei genitori, a cui dedico questo lavoro di tesi: senza il loro aiuto non avrei mai raggiunto questa meta. Sono davvero grato per tutto il sostegno economico, ma più di ogni altra cosa di quell'aiuto tacito o esplicito che è venuto dal loro cuore.

Mi auguro che tutti i sacrifici spesi siano in questo modo, almeno in parte, ripagati.