

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



Studio di un veicolo ibrido serie con configurazione innovativa

Relatore: Prof. Ferdinando Luigi MAPELLI

Co-relatore: Ing. Davide TARSITANO

Tesi di Laurea di:

Giancarlo RIBOLI Matr. 712275

Francesco SALA Matr. 711818

Anno Accademico 2008 - 2009

Indice

Introduzione	4
Abstract.....	9
Capitolo I Veicoli ibridi	13
1.1 Soluzioni applicative per i veicoli ibridi	13
1.2 Architettura dei veicoli ibridi di tipo serie	16
1.3 Architettura dei veicoli ibridi di tipo parallelo	18
Capitolo II Stato dell'arte	21
2.1 Batterie	21
2.1.1 Batterie al piombo (Pb acido, Pb gel)	22
2.1.2 Batterie al nickel (NiCd, NiMH, NiZn)	23
2.1.3 Batterie agli ioni di litio (Li-ion)	23
2.1.4 Batterie ai polimeri di litio (Li-Po)	23
2.1.5 Batterie ZEBRA (Ni-NaCl)	24
2.2 Azionamenti elettrici	25
2.2.1 Motori a induzione	26
2.2.2 Motori brushless	27
2.2.3 Motori a riluttanza variabile	28
2.3 Series Hybrid Electric Vehicle (SHEV)	29
2.3.1 Accoppiamento motori endotermici e generatori elettrici	29
2.3.2 Dall'ibrido serie all'elettrico puro	32
2.3.3 Soluzioni innovative per i motori endotermici nelle applicazioni ibride	35
2.3.4 Gestione delle sorgenti energetiche a bordo veicolo.....	39
2.4 Hub Motor e In Wheel Motor	40
Capitolo III Dimensionamento dei componenti	48

3.1 Scelta del veicolo di riferimento	48
3.2 Alleggerimento del corpo vettura	49
3.3 Dimensionamento dei componenti.....	51
3.3.1 Dimensionamento del pacco batterie	56
3.3.2 Dimensionamento degli organi di propulsione	59
3.3.3 Dimensionamento della motoruota	63
3.3.4 Geometria della singola motoruota	65
Capitolo IV Descrizione del modello	79
4.1 Pilota	81
4.2 Gestore di bordo.....	81
4.3 Motore a combustione interna.....	83
4.4 Generatore elettrico.....	87
4.5 Batterie	90
4.6 Azionamenti Brushless	92
4.7 Veicolo	99
4.8 Gestione dell'energetica di bordo.....	100
4.9 Dati di targa e prestazioni dei componenti.....	107
4.9.1 Motoruote	107
4.9.2 Batterie.....	108
4.9.3 Motore endotermico.....	110
4.9.4 Generatore.....	111
Capitolo V Risultati delle simulazioni.....	112
5.1 Ciclo ECE	112
5.1.1 Presentazione del ciclo.....	113
5.1.2 Verifica dell'autonomia in puro elettrico.....	115
5.1.3 Valutazione della ricarica a bordo.....	121
5.2 Ciclo EUDC.....	138
5.2.1 Presentazione del ciclo.....	139

5.2.2 Verifica dell'autonomia in puro elettrico.....	142
5.2.3 Valutazione della ricarica a bordo.....	147
5.3 Ciclo reale.....	158
Conclusioni	164
Ringraziamenti.....	170
Bibliografia	171

Introduzione

Si prevede che il numero di veicoli che circoleranno nel mondo nei prossimi 50 anni aumenterà fino ad arrivare a 2.5 miliardi ([1],[2]); questa prospettiva richiede lo sviluppo di veicoli ad emissioni ridotte o nulle, soprattutto nelle zone densamente popolate, ed un aumento dell'efficienza della conversione energetica, al fine di contenere lo sfruttamento delle materie prime. A questo riguardo, le principali ricerche nell'ambito automobilistico hanno individuato i veicoli elettrici ed ibridi come soluzioni effettivamente realizzabili per risolvere i problemi sopracitati. I veicoli elettrici immagazzinano energia proveniente dalla rete in accumulatori elettrochimici; questa energia viene poi utilizzata per la trazione durante la marcia. Nonostante i vantaggi, i sistemi di accumulo elettrochimico non sono ancora in grado di competere con i combustibili convenzionali nel settore dei trasporti; le principali carenze delle batterie rispetto ai combustibili fossili risiedono in una bassa densità di energia ed in tempi di ricarica non paragonabili ai tempi di rifornimento del carburante per una vettura tradizionale. Per sopperire ai limiti tecnologici dei veicoli elettrici, una soluzione è rappresentata dalle vetture ibride. Questo tipo di veicoli, grazie all'utilizzo contemporaneo di accumulatori elettrochimici e combustibili convenzionali, riesce a conciliare i benefici dei veicoli elettrici con l'autonomia e le prestazioni che caratterizzano i veicoli tradizionali. I veicoli ibridi sono dotati di due sistemi di propulsione: elettrico e termico. La parte elettrica è reversibile e permette di recuperare l'energia cinetica in frenata. Usare l'energia elettrica per il trasporto, permette di sfruttare un vettore energetico ad elevata efficienza, e con una frazione relativamente grande di

energia proveniente da fonti rinnovabili o, comunque, non responsabili dell'emissione di ossido di carbonio. Una grande diffusione dei veicoli ibridi porterebbe ad un aumento dell'efficienza dei trasporti, una riduzione delle emissioni di anidride carbonica e dei gas inquinanti.

La ricerca del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano si inserisce in questo contesto: in particolare, tra il 2006 ed il 2008, è stato realizzato un prototipo di un'auto bimodale, partendo da una vettura tradizionale, e realizzando un sistema di ibridizzazione elettrico facilmente installabile anche a veicolo già assemblato, che non stravolgesse il layout ed i componenti della vettura stessa. In parallelo a questo, è stato realizzato un modello numerico di simulazione della vettura ibrida completamente parametrico.

In questo ambito di ricerca, si è pensato allo sviluppo di un veicolo ibrido serie innovativo, che possa unire al suo interno i vantaggi tipici dell'ibrido di tipo serie, con quelli derivanti dalla scelta specifica di una propulsione innovativa, in questo caso garantita da un sistema di quattro motoruote indipendenti. In particolare, la scelta di fornire la potenza necessaria per la trazione attraverso un sistema innovativo di quattro motoruote, a fronte di un aumento di peso causato dalla presenza dei quattro motori e di tutti i dispositivi necessari, porta all'eliminazione della frizione e di tutti i sistemi di trasferimento della potenza, in quanto essa è sviluppata direttamente sulle ruote. In questo modo quindi, si eliminano le masse di questi organi e le perdite energetiche ad essi correlate. In secondo luogo, la possibilità di controllare ogni singola ruota aumenta le capacità di controllo della vettura, e si può quindi pensare che questo sistema consenta anche di aumentare la sicurezza stradale.

Gli obiettivi di questa tesi sono i seguenti:

- eseguire un primo dimensionamento degli organi energetici e propulsivi del veicolo, scegliendo come vettura di studio un tipo di macchina a grande diffusione, qual è una citycar. Per realizzare questo obiettivo, si dimensionano i componenti

necessari a garantire la trazione, imponendo delle prestazioni desiderate che siano concorrenziali con quelle della vettura tradizionale e delle altre vetture ibride di quella categoria. Un parametro importante è, a questo riguardo, l'autonomia in puro elettrico: è fondamentale infatti avere a bordo un pacco batterie che garantisca un'autonomia in linea con i principali prototipi presenti sul mercato. La progettazione ed il dimensionamento degli organi di trazione vengono effettuati ponendo particolare attenzione alla semplicità realizzativa ed all'efficienza; per questo motivo si impiegano soluzioni già disponibili sul mercato (come è già stato fatto nel caso dell'auto bimodale), che possano quindi essere adottate e realizzate in tempi brevi.

- Costruire un modello energetico numerico, attraverso il linguaggio di programmazione Matlab/Simulink®, che permetta lo studio delle prestazioni della vettura e la valutazione delle diverse soluzioni progettuali. Attraverso il modello, si vuole verificare la validità dei dati energetici ricavati nella prima parte della tesi, utilizzando due tra le più diffuse logiche di controllo per i veicoli ibridi serie, e valutare le prestazioni, i consumi, e tutte le principali grandezze relative alla vettura in esame.

La tesi è così strutturata:

- il capitolo I tratta le possibili realizzazioni automobilistiche sviluppate per diminuire le emissioni e garantire una migliore efficienza, tra le quali si ricordano i veicoli elettrici, gli ibridi (con motori endotermico ed elettrico o quelli con fuel-cell e motore elettrico) ed i motori a combustione interna ad idrogeno. Per ogni soluzione si identificano pregi e difetti.
- Nel capitolo II viene presentato lo stato dell'arte delle diverse tipologie di batterie presenti sul mercato e degli azionamenti elettrici più adatti per le applicazioni

sopra ricordate. Viene inoltre analizzato lo stato dell'arte dei veicoli ibridi elettrici di tipo serie, focalizzandosi sulle diverse alternative investigate dalla ricerca automobilistica. Vengono inoltre descritti i più moderni prototipi di automobile che impiegano le motoruote per la propulsione.

- Nel capitolo III si effettua il dimensionamento delle componenti energetiche necessarie a garantire l'avanzamento del veicolo prescelto, imponendo delle caratteristiche che rendano questa vettura concorrenziale rispetto a quelle presenti sul mercato. Si dimensionano quindi il pacco batterie da montare a bordo, il motore endotermico con l'annesso generatore elettrico, ed infine il sistema delle quattro motoruote indipendenti.
- Nel capitolo IV si descrive il modello del veicolo, realizzato con il software Matlab Simulink®, nel quale si evidenziano i blocchi relativi alla logica di controllo ed alla gestione dell'energetica di bordo: in questa trattazione, non si vuole scegliere quale tra le innumerevoli possibilità presenti in letteratura sia la migliore strategia di controllo, ma si vogliono verificare le prestazioni ed i consumi della vettura, imponendo due tra le più diffuse logiche di controllo adatte all'ibrido serie. Sono presenti nel modello anche i blocchi relativi al motore endotermico, con l'annesso generatore, alle motoruote con i relativi inverter, al pacco batterie, ed un blocco che rappresenta la dinamica longitudinale del veicolo.
- Nel capitolo V si presentano i risultati delle simulazioni ottenute dal modello. Si forniscono i risultati delle simulazioni riguardanti i parametri energetici e meccanici dei sistemi di propulsione presenti nella vettura. Come riferimenti di velocità, si usano cicli normati (ECE ed EUDC) e cicli reali.
- Le conclusioni di questa tesi riassumono i risultati ottenuti e propongono possibili sviluppi futuri di ricerca.

I risultati ottenuti dimostrano come, a fronte di un contenuto aumento di peso, il dimensionamento effettuato consenta alla vettura innovativa in esame di ottenere un'ottima autonomia in puro elettrico, durante la percorrenza di cicli urbani ed

extraurbani. Il modello numerico della vettura innovativa considerata descrive le grandezze elettromeccaniche salienti delle due logiche di controllo esaminate. Questi valori evidenziano come una di esse garantisca l'efficiente sfruttamento del motore endotermico e la veloce ricarica delle batterie presenti a bordo, mentre impone fluttuazioni più marcate alla potenza di ricarica ed alle altre grandezze di batteria. L'altra logica invece limita le fluttuazioni della potenza di ricarica, aumentando l'efficacia delle batterie e allungandone il ciclo di vita, ma non garantisce che il motore endotermico lavori nel proprio punto di ottimo.

Abstract

The number of motor vehicles on the road is expected to be growing to 2.5 billion in the next 50 years ([1],[2]). Especially in densely populated areas, this projection calls for the development of low or zero emission vehicles being accompanied by an increase in the efficiency of the energy conversion process. The ultimate aim is to limit the demand for crude and refined oil. To achieve this goal, prominent automotive research and development has focused on improving electric and hybrid vehicles as they appear the main feasible solutions to the aforementioned problems.

Electric vehicles draw power from the electric grid and store it in electro-chemical accumulators which will be discharged to provide the traction necessary to the journey. Despite their positive features, electro-chemical storage systems cannot compete successfully with the existing fossil fuels technology for the transport sector yet. In fact, the former are inferior to the latter because of their lower energy density and higher recharging time, compared to the time it takes to fill up a traditional internal combustion engine vehicle. Hybrid vehicles constitute a solution to the limitations of the electric ones since the former encompass the best features of both technologies. In fact, using simultaneously the electro-chemical accumulators and the fossil fuels to deliver the necessary power hybrid vehicles benefit from the positive features of electric vehicles and reach the range typical of combustion engine vehicles. Therefore, a thermal and an electric propelling system are required to move the vehicle. The electric component is reversible and allows for the kinetic energy to be transformed into electric current directed to the batteries when braking. Therefore, the availability of a highly efficient electric vehicle and of a significant, and rising, share of electricity being produced out of renewable sources

constitute interesting premises to increased efficiency in transportation and to the containment and/or reduction of CO₂ emissions.

The Mechanics Department at the Politecnico di Milano has accumulated long-term experience in this field of research. From 2006 to 2008, it has developed a concept car, starting from a traditional vehicle, which featured an electric hybridization system. The latter was easy to install, even in post-production, and did not alter the layout and the components of the vehicle greatly. Concurrently, a fully parametric numeric model simulating the car's behaviour was developed.

Building on previous expertise, the present research effort develops an innovative series hybrid vehicle encompassing the strengths of the series hybrid vehicles and of a system of four independent in-wheel motors employed to deliver the propulsion. The four in-wheel motors, despite being a quite heavy propelling solution - because of their own and the other ancillary components' weight -, eliminate the need for the clutch and for any other transmission components. In fact, the power originates right into the wheels. Besides saving weight on the above components, the associated energy losses are drastically reduced. Lastly, controlling each wheel separately yields higher overall vehicle control and might result in improved road safety.

The present thesis develops according to the following guidelines:

- Provide a first estimate of the requirements of the electric and power components of a mass-market city car. This procedure determines the features of the components that provide the traction by constraining the system to deliver the expected performance parameters. The latter need to be on par with those delivered by other traditional combustion engine and hybrid vehicles in the same market segment. The expected range in the pure electric mode is the crucial figure to be looked at. In fact, this will determine the size of the battery pack needed to compete with the expected range delivered by other competitors in the same

market. The design and the definition of the characteristics of the components delivering the traction is carried out limiting complexity and improving efficiency, i.e., using ready-made solutions available on the market which can then be tweaked easily and quickly according to need.

- Build a numeric energy model in Matlab/Simulink® to analyse the vehicle's performance and to evaluate the different construction strategies. The model will help to assess the correctness of the energy values obtained at the point above employing two of the most used control logics in the manufacturing of series hybrid vehicles. Moreover, the performance, the consumption per kilometre and several other vital parameters will be constantly monitored.

The present thesis is structured as follows:

- Chapter I reviews the feasible options implemented by the automotive industry to reduce CO₂ emissions and enhance efficiency. In particular, the electric and hybrid (internal fossil-fuel combustion engine coupled with an electric motor; fuel-cell and electric motor) vehicles as well as the ones with hydrogen combustion engines are detailed to highlight their strengths and weaknesses.
- Chapter II presents the state of the art in battery and actuation technology as required by each of the vehicles reviewed above. Moreover, the cutting edge technology in series electrical hybrid vehicles is thoroughly analysed by highlighting the different practical solutions deployed by the automotive industry. Lastly, the most advanced concept cars employing in-wheel motors are reviewed.
- Chapter III deals with the specification of the energy requirements of the moving selected city car. The feasibility constraint of the car being competitive with the other present in the same market segment is placed on the simulated model. Hence, the size of the battery pack is established, the endo-thermal motor and the connected electricity generator is modelled while the specification of the system of

four independent in-wheel motors needs to be consistent with all the other elements of this ideal car.

- Chapter IV describes the vehicle's model, written in Matlab Simulink®, highlighting the blocks dedicated to the control logic and the management of the on-board energetic components (at this stage of the thesis we are not interested in choosing the best control strategy among those available in the literature. On the contrary, we want to test the car's performance and consumption parameters against two of the most widespread control logics consistent with the series hybrid). Moreover, the blocks for the endo-thermal motor, the connected electric generator, the in-wheel motors with its inverters, the battery pack and the front-facing dynamic elements of the vehicle are all present and detailed.
- Chapter V presents the model simulations' results focusing on the energy and mechanical parameters of the propelling systems mounted on-board. The input data for the vehicle's speed are taken from established (ECE and EUDC) and real-life cycles.
- The concluding chapter summarises the findings presented and suggests future research options.

Our findings demonstrate that, allowing for a reasonable increase in the weight of the car, the specification of the components proposed for this innovative vehicle yields excellent results in the expected range achievable in the purely electric mode. This holds true irrespectively of whether the car is engaged in an urban or an extra-urban cycle. The numeric model prepared for the innovative vehicle considered here provides the relevant electro-mechanical values which allow us to characterise the two control logics used. According to these figures, one optimises the yield of the endo-thermal engine and recharges the batteries rather quickly but records significant fluctuations in the recharging power. The other creates more limited fluctuations in the recharging power, raises the effectiveness of the batteries – therefore extending their lifetime – but does not ensure that the endo-thermal motor produces its maximum yield.

Capitolo I

Veicoli ibridi

1.1 Soluzione applicative per i veicoli ibridi

Le soluzioni oggi offerte dal mercato dell'autoveicolo, che si contraddistinguono per una propulsione alternativa rispetto alle classiche a gasolio e benzina, si possono classificare nel modo seguente:

- veicoli elettrici;
- veicoli ibridi (motore endotermico ed elettrico);
- veicoli ibridi a idrogeno (fuel cell e motore elettrico);
- veicoli a combustione interna ad idrogeno.

I veicoli elettrici, per i quali si riporta in Figura 1.1 uno schema generale del *power train*, necessitano della presenza di accumulatori elettrochimici per immagazzinare l'energia

necessaria al moto. La scelta più comune ricade sulle batterie, ma si possono utilizzare anche condensatori o ultracapacitori.

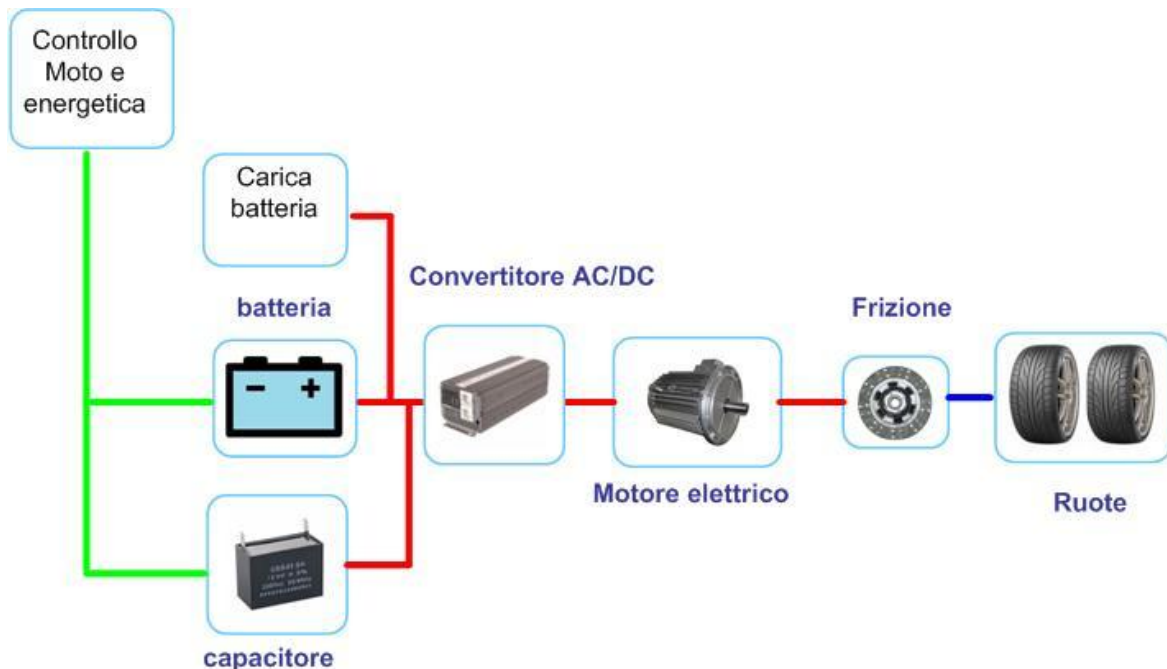


Figura 1.1. Elementi del power train per un veicolo a propulsione elettrica

Un veicolo a propulsione elettrica non richiede la presenza di alcuni organi meccanici, come il cambio e la frizione, per le caratteristiche di maggior elasticità dei motori elettrici nell'erogare coppie e potenze. L'efficienza risente positivamente del fatto che vengano sostituiti componenti di basso rendimento con altri che, in quanto elettrici, hanno migliori prestazioni. Inoltre, parte dell'energia generata può essere recuperata durante la fase di frenata e contribuisce a ricaricare gli accumulatori. Le emissioni nulle di CO₂ in atmosfera sono un altro aspetto molto positivo di questa soluzione tecnica. Di contro però bisogna menzionare prestazioni ancora non concorrenziali rispetto alle soluzioni classiche: l'autonomia è nella maggior parte dei casi contenuta (120-150 km), le massime velocità raggiungibili (circa 120 km/h) limitano l'impiego extraurbano, i tempi di ricarica (4-7 h) non sono paragonabili a quelli di un pieno di carburante, ed infine l'investimento iniziale è

indubbiamente consistente, nonostante la presenza di eco-incentivi volti a supportare la diffusione dell'auto elettrica.

I veicoli a propulsione ibrida puntano a fornire il valor medio della potenza richiesta, sfruttando in modo ottimale il motore a combustione interna e ricorrendo ad un sistema di accumulo, in linea di principio contenuto, per erogare i picchi di potenza necessari nei periodi di maggior richiesta (accelerazioni, salite, tratti ad alta velocità) o per immagazzinare la potenza in eccesso nei periodi di frenatura. È anche possibile marciare a motore endotermico spento, seppure per brevi tratti, come ad esempio nei centri urbani. In letteratura (si veda ad esempio [3]) si trovano diversi esempi di funzionamento del motore primo alla potenza media richiesta da un ciclo normato e, calcolando la potenza che deve essere temporaneamente accumulata nelle batterie, si nota che a queste ultime non sono richieste elevate capacità. Quest'aspetto risulta particolarmente interessante pensando alle difficoltà incontrate dai veicoli elettrici puri in relazione al sistema di accumulo e all'autonomia che essi devono garantire.

Si possono identificare due strutture di base per i veicoli ibridi, che rispondono alla seguente classificazione [4]:

- veicolo ibrido elettrico serie: è un veicolo ibrido in cui la potenza necessaria alla propulsione è fornita esclusivamente da un motore elettrico;
- veicolo ibrido elettrico parallelo: è un veicolo ibrido in cui la potenza necessaria alla propulsione è fornita da un motore elettrico e da uno endotermico.

L'ibrido serie si avvicina all'idea del veicolo elettrico puro, a cui sia stata data la possibilità di effettuare a bordo la ricarica, tramite un sistema di generazione; l'ibrido parallelo è più strettamente legato al concetto di veicolo tradizionale, nel quale il motore elettrico lavora *in parallelo* con quello a combustione interna, per coprire i picchi di richiesta e consentire il recupero in frenatura.

1.2 Architettura dei veicoli ibridi di tipo serie (SHEV)

Lo schema di principio di un veicolo ibrido serie è riportato in Figura 1.2.

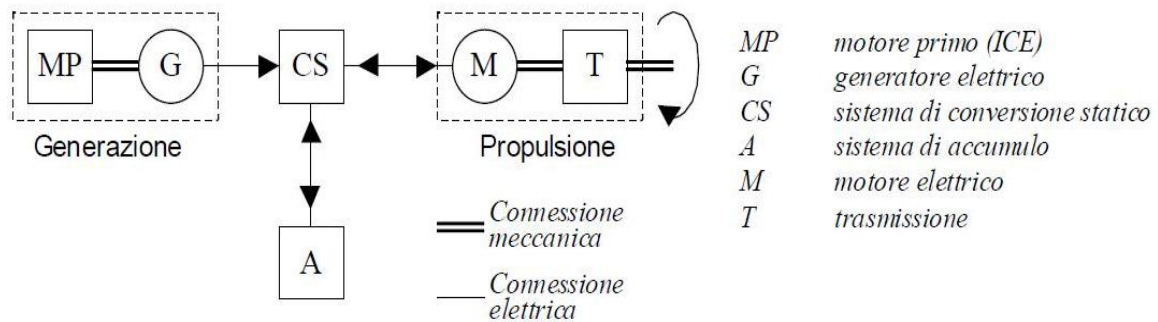


Figura. 1.2. Schema di principio di un veicolo ibrido serie [3]

Nell'ibrido serie l'energia prodotta dal motore primo viene trasformata direttamente in energia elettrica necessaria alla propulsione. A seconda delle scelte progettuali e delle strategie di controllo implementate, una parte dell'energia fornita dalla sorgente primaria può eventualmente servire anche per ricaricare la sorgente ausiliaria. La sorgente primaria può essere di due tipi: o un motore a combustione interna unito ad un generatore elettrico, oppure una cella a combustibile ad idrogeno (*fuel cell*). La sorgente ausiliaria è composta solitamente da un pacco batterie, ma possono essere presenti anche condensatori e volani, per i quali l'energia accumulata è rispettivamente pari a $\frac{1}{2}CV^2$ e $\frac{1}{2}J\omega^2$, dove C è la capacità del condensatore, V è la tensione presente all'interno del condensatore, J è il momento d'inerzia del volano e ω è la sua velocità angolare. L'energia elettrica stoccata è poi utilizzata da un azionamento elettrico di trazione, secondo lo schema riportato nella Figura 1.2 (in questo caso la sorgente primaria è un motore a combustione interna). La presenza del convertitore statico ha la funzione di interfacciare tra loro il generatore, il sistema di accumulo ed il motore elettrico. Il dimensionamento viene effettuato in base al valore di tensione del generatore e del sistema di accumulo, unitamente alle caratteristiche

del motore elettrico, per il quale è comunque necessaria a monte la presenza di un convertitore, al fine di controllarne coppia e velocità da fornire alle ruote.

Il verso dei flussi di potenza proposti in Figura 1.2 è rappresentativo del funzionamento a regime, escluso l'avviamento del motore primo, fase nella quale il generatore può, a seconda delle scelte progettuali, essere anche utilizzato come motorino di avviamento, assorbendo energia dal sistema di accumulo.

Con riferimento allo schema di Figura 1.2, il disaccoppiamento presente tra l'asse meccanico del motore endotermico e le ruote consente di ottimizzare la gestione del motore primo in relazione alle richieste di potenza, permettendo cioè di far lavorare il motore a punto fisso, sempre nella zona di maggior rendimento. Si nota inoltre che il disaccoppiamento rende possibile anche l'eliminazione della frizione e del cambio dalla configurazione finale del veicolo. Per la sua stessa configurazione progettuale, si può osservare che l'ibrido serie sviluppa piene prestazioni in puro elettrico, ed ha anche il vantaggio che la coppia elettrica si controlla in modo più soddisfacente rispetto a quella sviluppata da un motore a combustione interna. Di contro, in questa configurazione, si ha che il generatore, ed in generale tutta la componentistica elettrica, vengono necessariamente dimensionati per la piena potenza, aumentandone così gli ingombri ed il peso. Poiché inoltre si tende a volere una certa autonomia in puro elettrico, nell'ordine delle decine di chilometri, l'ingombro ed il peso delle batterie non sono trascurabili.

Analizzando rapidamente l'ibrido serie nella versione con le celle a combustibile, si può notare come questa tecnologia porti ad avere emissioni ridottissime (soprattutto se l'idrogeno è usato come combustibile) ed una elevata efficienza della catena, ma anche gli stessi svantaggi tipici della tecnologia ad idrogeno (cfr § 1.3).

1.3 Architettura dei veicoli ibridi di tipo parallelo (PHEV)

Per quanto riguarda il veicolo ibrido parallelo, lo schema generale è riportato in Figura 1.3.

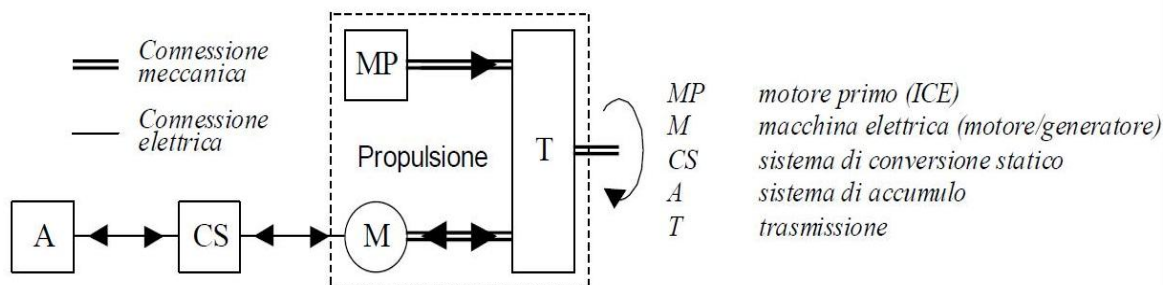


Figura 1.3. Schema di principio di un veicolo ibrido parallelo [3]

Nel veicolo ibrido parallelo, a differenza dello schema serie, sia il motore elettrico che quello endotermico possono fornire contemporaneamente potenza meccanica alla trasmissione. La parte elettrica non è perciò dimensionata per fornire piena potenza. In generale sono possibili tutte le configurazioni, ossia il funzionamento in elettrico puro, quello convenzionale con la sola trazione endotermica e l'ibrido, che si basa su un opportuno sistema di trasmissione. Il sistema di trasmissione nella configurazione di ibrido parallelo richiede numerosi organi, con conseguenti perdite energetiche per dissipazione, ed inoltre porta all'insorgere di vincoli costruttivi legati alla disposizione dei vari componenti. Il legame che intercorre tra la velocità delle ruote ed il punto di lavoro del motore primo non è completamente libero, e spesso ciò non consente di far lavorare il motore endotermico a regimi ottimali, come invece accade nell'ibrido serie. Da questo punto di vista, alcuni benefici possono essere ottenuti con l'uso di rotismi epicicloidali, per i quali la velocità di due dei tre assi facenti riferimento al rotismo (si veda la Figura 1.3) possono essere imposte in maniera indipendente, restando vincolata solo la terza. Confrontando le configurazioni serie e parallelo, si nota quindi che il sistema serie ha un

layout più flessibile e consente di evitare organi di trasmissione ingombranti e difficili da collocare, mentre l'ibrido parallelo necessita di una macchina rotante in meno (non prevede l'uso del generatore a bordo) ed è particolarmente adatto sia alla circolazione urbana che extraurbana, anche con lunghi tratti ad elevata potenza. Per quanto riguarda il veicolo ibrido parallelo, si può anche notare come i costi siano in linea con quelli dei veicoli tradizionali di fascia medio alta, e ciò spiega come anche sul mercato sia stato meglio recepito questo tipo di auto. Di contro, si deve valutare che non tutte le possibili configurazioni sono energeticamente vantaggiose: le prestazioni con uno solo dei due motori attivi non sono molto elevate. Per l'ibrido parallelo, inoltre, l'autonomia in puro elettrico è generalmente ridotta.

Per quanto riguarda i veicoli basati sulla tecnologia ad idrogeno, è necessario che siano risolte alcune problematiche per poter pensare ad una successiva commercializzazione. Tra queste si ricordano in particolare la necessità di una maggiore sicurezza nello stoccaggio a bordo dell'idrogeno, la presenza di punti di distribuzione, le metodologie di produzione dell'idrogeno, i costi ad oggi troppo elevati e la scarsa durata ed affidabilità delle celle.

Per quanto riguarda il rendimento energetico dei diversi veicoli dalla sorgente alla ruota, nella letteratura dedicata [3] si trova che, per un veicolo tradizionale, ci si attesta attorno al 28%, per un veicolo elettrico al 32%, per un ibrido (serie o parallelo) con produzione di energia elettrica a bordo al 40.5% e per un veicolo ibrido a *fuel cell* al 43%.

In conclusione, si può quindi notare come i veicoli ibridi ad idrogeno siano sulla carta i migliori, ma la tecnologia ad oggi non è ancora completamente matura. I veicoli elettrici ed ibridi sono invece già in produzione di serie e possono contribuire ad una riduzione delle emissioni inquinanti ed ad un risparmio energetico e di combustibili fossili. In particolare, i veicoli elettrici hanno emissioni nulle, ma sono ottimali solo per impieghi di bassa percorrenza e limitate prestazioni. I veicoli ibridi al contrario, rispetto ai veicoli tradizionali, hanno le stesse prestazioni con una diminuzione delle emissioni ed un

aumento dell'efficienza di conversione. Per queste ragioni si può ragionevolmente pensare ad un loro sviluppo concreto e sostanziale per il presente e per il futuro.

Capitolo II

Stato dell'arte

2.1 Batterie

Si è visto in precedenza che le batterie e gli azionamenti elettrici sono componenti fondamentali per lo sviluppo di tutti i veicoli ibridi. Di seguito viene fornita una descrizione delle principali caratteristiche di entrambi gli elementi. Per le applicazioni nell'ambito dei veicoli, in relazione ai tipi di reagenti impiegati, sono attualmente disponibili sul mercato differenti tipologie di accumulatori [5], [6], [7]:

- piombo acido;
- piombo gel;
- nickel-cadmio;
- nickel-idruri di metallo;
- nickel-zinco;
- litio ioni;

- litio polimeri;
- zebra (Ni-NaCl).

Di seguito si fornisce una descrizione sommaria delle tipologie di batterie sopra elencate, evidenziando in particolare quelli che sono i valori dei parametri prestazionali tipici e le caratteristiche salienti.

Dal punto di vista dei parametri tipici degli accumulatori, oltre alla tensione nominale, ottenuta come somma di quella nominale delle singole celle collegate in serie, si definisce la capacità, misurata in Ampèreora [Ah], ovvero la quantità di corrente che la batteria completamente carica può fornire in una fase di scarica di durata indicata, in determinate condizioni (tensione finale di scarica, temperatura e regime di scarica). Particolare importanza rivestono poi, soprattutto per quanto riguarda le applicazioni su veicoli, i dati di tipo energetico. Si ricordano l'energia specifica, misurata in [Wh/kg], e la potenza specifica, definita in [W/kg]. Vengono infine definiti parametri concernenti la durata della vita della batteria (in generale in cicli di carica e scarica) e le condizioni di utilizzo ed installazione, al fine di garantire il corretto funzionamento del dispositivo.

2.1.1 Batterie al piombo (Pb acido, Pb gel)

La cella piombo-acida è il costituente fondamentale dei comuni accumulatori per auto ed è disponibile in un gran numero di configurazioni. Si utilizza un anodo fatto di polvere di piombo (Pb) spugnoso ed un catodo di diossido di piombo (PbO₂). L'elettrolita è una soluzione di acido solforico (H₂SO₄) 4.5 M. La differenza di potenziale ai poli è di 2.1 V. Per questo, negli accumulatori per automobili si trovano sei celle piombo-acide in serie che generano una differenza di potenziale complessiva di 12 V. Nei modelli di ultima generazione infine, si utilizza una lega di piombo che inibisce l'elettrolisi dell'acqua, potenzialmente pericolosa in quanto produce H₂ e O₂ con rischio di esplosioni.

Tale tipo di accumulatore eroga correnti molto elevate, è affidabile e di lunga vita e funziona bene a basse temperature; ha però bassa energia specifica e contiene piombo che è un metallo pesante ed è tossico. Queste problematiche di impatto ambientale e di sicurezza sono

state risolte dalla seconda generazione di tali batterie, costituita dalle cosiddette piombo sigillate o gel.

2.1.2 Batterie al nickel (NiCd, NiMH, NiZn)

Le batterie al nickel-metallo idruro (NiMH) stanno ormai sostituendo le vecchie batterie al nickel-cadmio (NiCd), più tossiche e meno efficienti. Queste ultime, pur essendo leggere e ad alta energia specifica, risentono infatti di un “effetto memoria” assente invece in quelle a idruri di metallo. All’anodo si ha l’ossidazione dell’idrogeno assorbito su leghe metalliche di nickel, al catodo la riduzione del nickel; l’elettrolita è sempre una pasta basica di idrossido di potassio. La differenza di potenziale ai poli è di 1.4 V. La durata di vita è relativamente buona, a fronte però di un costo abbastanza elevato. Le batterie al nickel-zinco (NiZn) sono caratterizzate sia da energia specifica, sia da potenza specifica elevata, ma anche da un basso numero di cicli di vita e dalla necessità di una fase iniziale di rodaggio.

2.1.3 Batterie agli ioni di litio (Li-ion)

I moderni accumulatori al litio sono potenti e leggeri, anche se ancora relativamente costosi. All’anodo si hanno degli atomi di litio “immersi” in strati di grafite, il catodo è un sale di Li (solitamente LiMn_2O_4) e l’elettrolita è una soluzione di perclorato di litio (LiClO_4) in etilencarbonato ($\text{C}_2\text{H}_4\text{CO}_3$), un solvente organico. La differenza di potenziale ai poli è di 3.7 V. Sono dotati di un’elevata energia specifica e non risentono di nessun “effetto memoria”. Il costo è piuttosto elevato.

2.1.4 Batterie ai polimeri di litio (Li-Po)

Sono batterie che derivano dall’evoluzione tecnologica di quelle agli ioni di litio; come queste quindi necessitano di un sistema di controllo elemento per elemento. La principale caratteristica che le contraddistingue è che l’elettrolita in sale di litio non è contenuto in un solvente organico, come nelle litio-ioni, ma si trova in un composito di polimero solido, ad esempio poliacrilonitrile. Vi sono molti vantaggi in questo tipo di costruzione che la rendono superiore al disegno classico litio-ione, tra cui il fatto che il polimero solido non è

infiammabile (a differenza del solvente organico che le cellule a Li-Ion utilizzano): queste batterie sono dunque meno pericolose in caso di danneggiamento.

La differenza di potenziale ai poli è di circa 4 V. Queste batterie sono dotate di un'energia specifica superiore a quella del tipo litio-ioni. Il vantaggio è legato al fatto che le batterie litio-ioni sono contenute in minuscoli contenitori rigidi in metallo, mentre le attuali celle polimeriche hanno una struttura a fogli flessibili. Esse quindi non necessitano di un contenitore ed hanno un impacchettamento più denso rispetto a quelle litio-ioni, con conseguente maggiore densità energetica. Le potenze specifiche sono molto elevate, il costo ancora piuttosto ingente.

2.1.5 Batterie ZEBRA (Ni-NaCl)

Le batterie ZEBRA, ancora non molto diffuse, sono dotate di caratteristiche energetiche e prestazionali estremamente elevate, anche se hanno la necessità di lavorare ad una temperatura costante di circa 260 °C. Le “batterie al sale” sono ovviamente innocue dal punto di vista ambientale, ma si auto scaricano in 8-10 giorni e per questo motivo necessitano di un'ulteriore sviluppo per poter arrivare ad avere una diffusione più ampia.

In Figura 2.1 si riporta un grafico riepilogativo delle tipologie di accumulatori sopra descritti, mostrando come essi si distribuiscono in relazione alle loro caratteristiche energetiche.

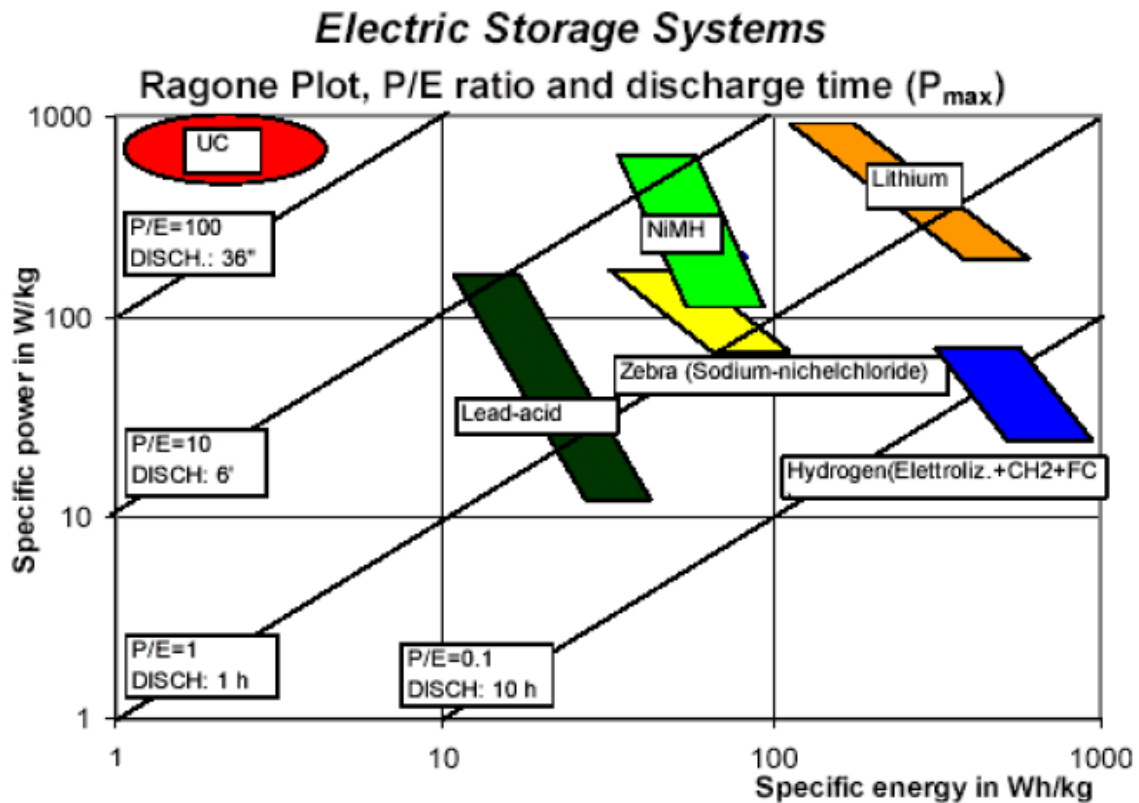


Figura 2.1. Diagramma riepilogativo degli accumulatori elettrici, in funzione delle prestazioni energetiche. [8]

In definitiva, le tecnologie attualmente utilizzabili e promettenti per i veicoli sono soprattutto le batterie al litio, ed in aggiunta le Zebra e le NiMH, mentre le batterie al piombo rimangono una tecnologia economica per i veicoli senza prestazioni stringenti.

2.2 Azionamenti elettrici

Di seguito si riportano gli azionamenti elettrici che possono essere utilizzati nella trazione ibrida [9], [10]. La scelta dell'azionamento elettrico è strettamente legata al tipo di architettura del veicolo ibrido [11]: cambiando la disposizione del motore all'interno del

drivetrain mutano le condizioni operative, e questo influenza inevitabilmente la scelta del tipo di motore. La funzione del motore elettrico, in questa applicazione ibrido serie con configurazione innovativa, è ovviamente fondamentale per la trazione, e ciò comporta che sia necessario dimensionare e scegliere opportunamente il tipo di motore in relazione a problematiche quali gli ingombri, il peso e l'efficienza. Da un punto di vista qualitativo, il profilo ideale coppia-velocità, per un'applicazione di trazione, è quello a potenza costante sull'intero campo di operatività. Questo andamento consente infatti di avere la massima accelerazione possibile, a potenza massima dell'azionamento fissata, oppure permette di minimizzare la potenza necessaria ad accelerazione imposta. Nei motori endotermici si modula la propulsione attraverso l'uso del cambio, in modo tale da avere un profilo effettivo di coppia-velocità il più possibile corrispondente a quello a potenza costante. Nei motori elettrici il cambio non è necessario, in quanto il controllo del motore stesso modula la caratteristica di trazione secondo il tratto a potenza costante.

I primi motori elettrici utilizzati per la trazione, soprattutto per piccoli veicoli, sono stati quelli a corrente continua a magneti permanenti o ad eccitazione separata. Essi hanno però problemi di manutenzione (a causa della presenza di spazzole e collettori), di basso rendimento e di complessità di costruzione. Per questo, quando l'evoluzione tecnologica ha portato allo sviluppo dell'elettronica di potenza e di tecniche di controllo più moderne (tecniche *firmware*, controllo vettoriale o diretto in coppia), sono stati sviluppati ed utilizzati per la trazione altri tipi di motori, tra i quali l'asincrono, il brushless ed il motore a riluttanza variabile.

2.2.1 Motori ad induzione

Nel motore ad induzione (asincrono) lo statore è alimentato da una tensione alternata trifase, mentre il campo magnetico di rotore viene creato per induzione, eliminando quindi la presenza di contatti striscianti e dei magneti. Le principali caratteristiche di questo motore sono:

- ridotti costi di produzione;
- necessità di manutenzione praticamente nulla ed elevata robustezza;
- con opportune tecniche si può disaccoppiare il controllo della coppia da quello della generazione del campo magnetico di rotore;
- rapporto di elasticità molto elevato, con una velocità massima circa doppia di quella base (con una progettazione specifica questo fattore aumenta fino a 3-5 volte la velocità base);
- bassa densità di coppia per massa, che comporta un'elevata massa del motore per avere una coppia fissata;
- bassa densità di coppia per volume, che porta ad avere elevati ingombri;
- rendimento inferiore rispetto ad altri azionamenti;
- elevato momento d'inerzia del rotore che ha al suo interno avvolgimenti di rame.

2.2.2 Motori brushless

Nel motore brushless (sincrono a magneti permanenti), rispetto all'asincrono, il campo magnetico rotorico è generato da magneti permanenti e le bobine di statore sono alimentate da un generatore equilibrato di corrente trifase. Le principali caratteristiche sono:

- alto rendimento (maggiore rispetto al motore ad induzione);
- alta densità di coppia per massa che consente di avere un peso minore a parità di coppia da fornire;
- alta densità di coppia per volume che consente di avere ingombri ridotti;
- momento rotorico d'inerzia particolarmente ridotto;
- costo elevato;
- necessità di mantenere il sincronismo: è necessario quindi avere un sensore per la misura della posizione del motore;
- elasticità molto limitata, il campo generato dai magneti può essere indebolito solo entro certi limiti, per non smagnetizzare il materiale, e questo porta ad avere un

limitato campo di velocità nel tratto a potenza costante. Ciò può limitarne l'uso in certe applicazioni di trazione.

2.2.3 Motori a riluttanza variabile

Il motore a riluttanza variabile consiste in uno statore con avvolgimenti di eccitazione e in un rotore di materiale ferromagnetico a poli salienti. Gli avvolgimenti di rotore non sono necessari perché la coppia è prodotta dalla tendenza del rotore ad allinearsi con lo statore, che produce il flusso. Questo è un grosso vantaggio perché dà luogo ad una riduzione delle perdite per indebolimento di campo. Le caratteristiche di questo motore sono:

- semplicità costruttiva;
- facilità nell'esecuzione e nello sviluppo del controllo;
- si possono raggiungere velocità molto elevate;
- la curva caratteristica coppia-velocità ha il tratto a potenza costante che si estende per un range di velocità molto ampio (i rapporti di elasticità possono arrivare ai valori 6-8); per questo motivo i motori a riluttanza variabile sono molto adatti per applicazioni di trazione;
- densità di coppia prossima a quella dei motori brushless;
- alto ripple di coppia;
- si riscontra la presenza di rumori acustici e dissipazioni dovuti alla ventilazione del rotore che non è cilindrico ma presenta una dentatura sulla superficie esterna;
- rendimento complessivo paragonabile a quello del motore asincrono.

In questa applicazione la scelta del tipo di batterie e del motore verrà effettuata in base alle caratteristiche e alle funzionalità che essa dovrà garantire.

2.3 Series Hybrid Electric Vehicle (SHEV)

La ricerca in materia di propulsione ibrida di tipo serie si muove in diverse direzioni, tra le quali è possibile identificare alcuni ambiti principali:

- l'integrazione sempre più performante della parte endotermica con quella elettrica (cfr § 2.3.1);
- lo sbilanciamento dell'ibrido verso una soluzione pura elettrica (cfr § 2.3.2);
- lo studio di soluzioni alternative per i motori endotermici (cfr § 2.3.3);
- lo studio di logiche che ottimizzino la gestione del flusso di energia (cfr § 2.3.4).

2.3.1 Accoppiamento di motori endotermici e generatori elettrici

L'obiettivo è quello di realizzare un sistema con prestazioni elevate, che coniughi il range di massimo rendimento del motore endotermico con quello del generatore di corrente. È noto che il rendimento del motore endotermico non è costante, ma varia in base al numero di giri, al carico applicato, all'ammissione, alla temperatura di esercizio. È però possibile porsi in una condizione di ottimo e sfruttare per la regolazione il generatore, garantendo così la necessaria elasticità per il funzionamento su un ampio campo di velocità. L'efficienza del sistema complessivo viene quindi migliorata, rispetto al caso della propulsione tradizionale. Sia in ambito accademico che industriale, si sono realizzati prototipi e modelli muniti di un sistema range extender [12] [13], che metta in pratica questa idea. Inizialmente le soluzioni sono state studiate per rendere ibridi dei veicoli puramente elettrici. All'autovettura sono stati aggiunti traini su cui è stato posto il gruppo motogeneratore che fornisce la corrente necessaria per la ricarica delle batterie. Il vantaggio è costituito dal fatto che, nel caso di un impiego urbano con spostamenti contenuti, il peso dell'appendice motoristica può essere staccato. Di contro però il carrello causa problemi alla dinamica del veicolo, oltre ad essere poco comodo e a precludere qualsiasi possibilità di marketing per una produzione su larga

scala. Nell'ottica della riduzione dei costi e della massa complessiva (il traino presenta in ogni caso un telaio e una coppia di ruote che devono essere aggiunte), si è quindi passati alla soluzione "on board". Il primo approccio è stato banalmente l'affiancamento del generatore elettrico al motore a combustione interna montato di serie sull'autovettura (Figura 2.2); sebbene economico dal punto di vista dell'ingegnerizzazione, questo porta ad un sovradimensionamento della potenza complessiva disponibile e ad uno spreco ingente in termini di peso.



Figura 2.2. Accoppiamento ICE e Generatore Toyota

Si è quindi proceduto verso vetture che intendessero come un unico organo l'insieme dei due mezzi propulsivi. Con l'affermarsi in maniera concreta di questi primi tentativi, la naturale evoluzione che dovrà avere la ricerca in questo campo sarà quella della maggiore integrazione possibile tra le due componenti. Questa è in parte subordinata alla necessaria ottimizzazione del motore endotermico e del generatore elettrico, considerati singolarmente. Per il primo sono all'avanguardia prototipi che possono essere alimentati da combustibili di diversa natura, sia fossile che alcoolica, mantenendo elevati valori di efficienza. L'ambito di

miglioramento per la parte elettrica concerne principalmente la contrazione dei pesi. Sul mercato esistono molteplici tipologie di motori elettrici in grado di sopperire a qualsiasi richiesta: il problema è quindi costituito dalla assemblaggio di queste soluzioni a bordo, tenendo presente che la massa è sempre un parametro critico, quando è da conciliare con i consumi. Un buon esempio di quanto detto è rappresentato dal motore “range-extender” di marchio LOTUS (Figura 2.3). Il monoblocco, comprensivo di cilindri, testata e condotto di scarico, è in alluminio con il vantaggio di ridurre la massa del motore, i costi di assemblaggio delle singole parti, ed allo stesso tempo permette di aumentare la vita utile e l'affidabilità, diminuendo contemporaneamente il livello delle emissioni in atmosfera. Questo moto-generatore è ottimizzato in un range compreso tra due punti, che forniscono rispettivamente 15 kW di potenza elettrica a 1500 rpm e 35 kW a 3500 rpm. La massa totale del moto-generatore è di soli 56 kg. Le alimentazioni possibili sono molteplici, come riportato in Tabella 2.1.



Figura 2.3. Range Extender di marchio Lotus

CARATTERISTICHE	DATI
Generale	1200 cc 3 cilindri, 2 valvole per cilindro Trasmissione a cinghia
Costruttiva	Monoblocco con collettore di scarico integrato Generatore direttamente accoppiato
Materiale	Alluminio
Alesaggio e corsa	75.0 mm x 90.0 mm
Rapporto di compressione	10:1
Potenza massima in uscita dal generatore	35 kW a 3500 rpm
Coppia di picco	107 Nm a 2500 rpm
Massima pressione (BMEP)	11.2 bar
Massima velocità del motore	3500 rpm
Combustibile	Etanolo/metanolo/benzina
Massa a secco	56 kg

Tabella 2.1. Dati tecnici del moto-generatore Lotus [14]

2.3.2. Dall'ibrido serie all'elettrico puro

Il concetto di ibrido si riferisce anche a quei casi in cui vengono adottati motori a combustione interna di taglia ridotta e prestazioni più modeste, che svolgano prevalentemente il ruolo di ricaricare le batterie, lasciando il compito di spingere il veicolo alle batterie stesse. Queste ultime sono il vero argomento principe della ricerca, poiché devono essere in grado di sopperire da sole alle richieste del guidatore. Gli studi sono rivolti a garantire autonomie sempre maggiori, senza eccessivi aumenti dei pesi. Sul mercato, al

momento, non sono presenti soluzioni ibride di tipo serie dotate di range extender, nell'accezione che qui se ne fa. Il primo modello che potrà essere annoverato in questa categoria sarà probabilmente la Chevrolet Volt [15], attesa per metà 2010. Quest'auto, che sarà prodotta in larga scala, si dichiara come un E-REV (Extended-Range Electric Vehicle) e viene presentata come munita di un motore endotermico di piccola taglia, per l'esclusiva ricarica delle batterie. Queste garantiranno una autonomia annunciata pari a 60 km, decisamente superiore a quella delle auto ibride attualmente disponibili.



Figura 2.4. Drive Train Chevrolet Volt [15]

Il 2010 si annuncia come l'anno che porterà sulle strade il maggior numero di modelli elettrici. La congiuntura economico ambientale ha reso di moda l'idea dell'auto che non inquina e consuma poco. I modelli di auto elettrica (EV) più tecnologicamente avanzati saranno commercializzati da case produttrici emergenti, che faranno uso di tecniche di vendita su prenotazione. Il modello più interessante per quanto riguarda l'Europa, che vede

anche una attiva partecipazione italiana, è la Bluecar, nata dalla collaborazione tra i gruppi Pininfarina e Bolloré.



Figura 2.5. La Pininfarina Bluecar

Dal punto di vista tecnico, l'aspetto più interessante è rappresentato dalle batterie di tipo L.M.P (Litio Metal Polimeri), che dovrebbero garantire a questa citycar un'autonomia di 250 km con una carica completa (molto più di quello che è generalmente considerata l'autonomia urbana di una vettura), con una vita utile dichiarata pari a 200.000 km. Innovativo anche l'inserimento di celle solari sul tetto e sul cofano per l'alimentazione degli impianti ausiliari.

Tra le grandi case, quella che sembra più orientata alla commercializzazione di modelli di EV è la Renault. A partire dagli studi della divisione giapponese del gruppo, la Nissan, la casa francese ha in progetto un'intera gamma a propulsione elettrica, che possa essere sul mercato nel giro dei prossimi due anni.

A livello globale è poi necessario menzionare due case d'oltreoceano che si inseriscono in segmenti decisamente elitari, ma che permettono di avere una idea delle ottime prestazioni dinamiche insite nella propulsione elettrica. Per quanto riguarda i modelli sportivi va menzionata la Tesla motors, azienda che propone modelli basati su motori a induzione che permettono la percorrenza di circa 400 km con una carica.

Le auto di lusso avranno presto la loro ammiraglia tra i modelli della casa Karma Fisker. La casa americana propone un modello Plug In, con due possibilità di marcia: una volta alla lunga percorrenza, l'altra ad un'andatura sportiva (vengono dichiarati 200 km/h di velocità massima).



Figura 2.6. Il modello Karma Fisker di prossima diffusione sul mercato americano

2.3.3. Soluzioni innovative per i motori endotermici nelle applicazioni ibride

Un punto critico per il dimensionamento di tutti i veicoli ibridi è rappresentato dal motore endotermico, in quanto questo componente presenta i valori di efficienza più bassi all'interno del *drive train*. Soluzioni tecniche all'avanguardia, che contemplino anche la possibilità di contenere emissioni nocive, sono quindi al centro di specifici settori della ricerca.

A scopo esemplificativo, si prenda in considerazione una macchina di Stirling *free piston* come quella rappresentata in Figura 2.7. Si riportano brevi cenni sul suo funzionamento.

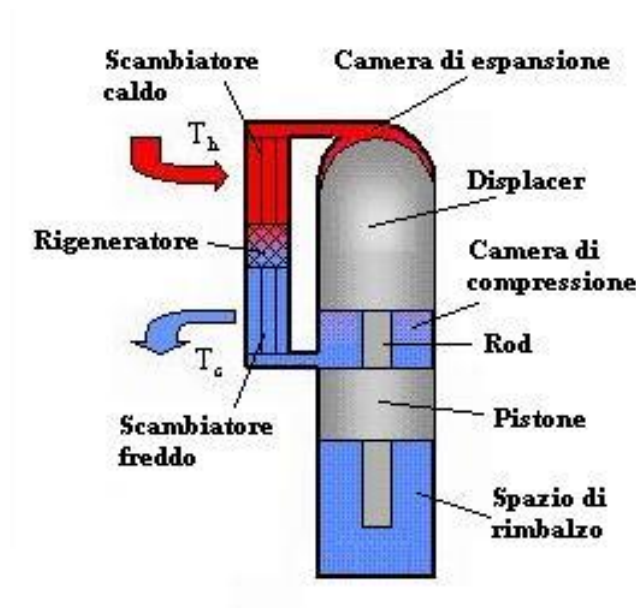


Figura 2.7: Descrizione della struttura del motore free piston

Si può notare che questa macchina è priva di manovellismo, e quindi affida alle variazioni di pressione il compito di muovere il pistone ed il displacer. Si trascura per semplicità, e perché comunque poco significativa rispetto alle altre forze in gioco, la forza di gravità agente sul displacer e sul pistone. Si trascura anche, per semplicità espositiva, la presenza del carico, degli attriti tra le parti in moto ed altri effetti dissipativi. Fornendo calore tramite lo scambiatore caldo al fluido presente in esso e nella zona di espansione, la pressione del fluido tende ad aumentare nella camera di espansione e di compressione, fino a sorpassare il valore della pressione vigente nella zona di rimbalzo. Per effetto delle forze di pressione agenti sulle superfici del pistone e del displacer, questi tendono a scendere. Essendo però il displacer notevolmente più leggero del pistone, ed essendo l'area della sezione del cilindro maggiore rispetto a quella del *rod*, l'accelerazione del displacer risulta superiore rispetto a quella del pistone. Il fluido quindi passa, attraverso gli scambiatori esterni, dalla camera di compressione alla camera di espansione, dove si scalda ulteriormente, aumentando ancora la differenza di pressione, e quindi le forze agenti sul pistone e sul displacer. Di conseguenza il pistone continua il suo moto ed il fluido subisce un'espansione. La pressione nello spazio di rimbalzo aumenta a causa del moto del pistone e del displacer fino a raggiungere e

sorpassare la pressione nello spazio di lavoro; le due masse invertono allora il loro moto, ma anche in questo caso il displacer ha un'accelerazione maggiore. Il moto combinato del pistone e del displacer causa il passaggio del fluido dalla camera di espansione alla camera di compressione, attraverso gli scambiatori ed il rigeneratore. Il fluido quindi subisce una diminuzione di temperatura a seguito dell'effetto rigenerativo e del calore ceduto nello scambiatore freddo; come conseguenza la pressione vigente nello spazio di lavoro diminuisce ulteriormente. Quando il displacer ha raggiunto il suo punto morto superiore, la quasi totalità del fluido è nella camera di compressione e viene compresso a seguito del moto del pistone. La pressione nello spazio di lavoro aumenta, mentre diminuisce quella vigente nello spazio di rimbalzo; ancora una volta le forze agenti sulle masse invertono le loro direzioni causando il moto del pistone e del displacer verso il basso ed il ciclo ricomincia.

Il lavoro netto è raccolto dal pistone, tramite un generatore elettrico lineare, come frequentemente accade nel caso di applicazioni nel settore automotive. La possibilità di estrarre lavoro dalla macchina è garantita dalla combinazione opportuna delle fluttuazioni di pressione e del movimento del pistone e del displacer. Il moto del solo displacer permette il passaggio del fluido dalla parte calda a quella fredda e viceversa, determinando le variazioni di pressione del fluido; il pistone effettua la compressione e l'espansione del fluido, ed in definitiva l'estrazione di lavoro utile.

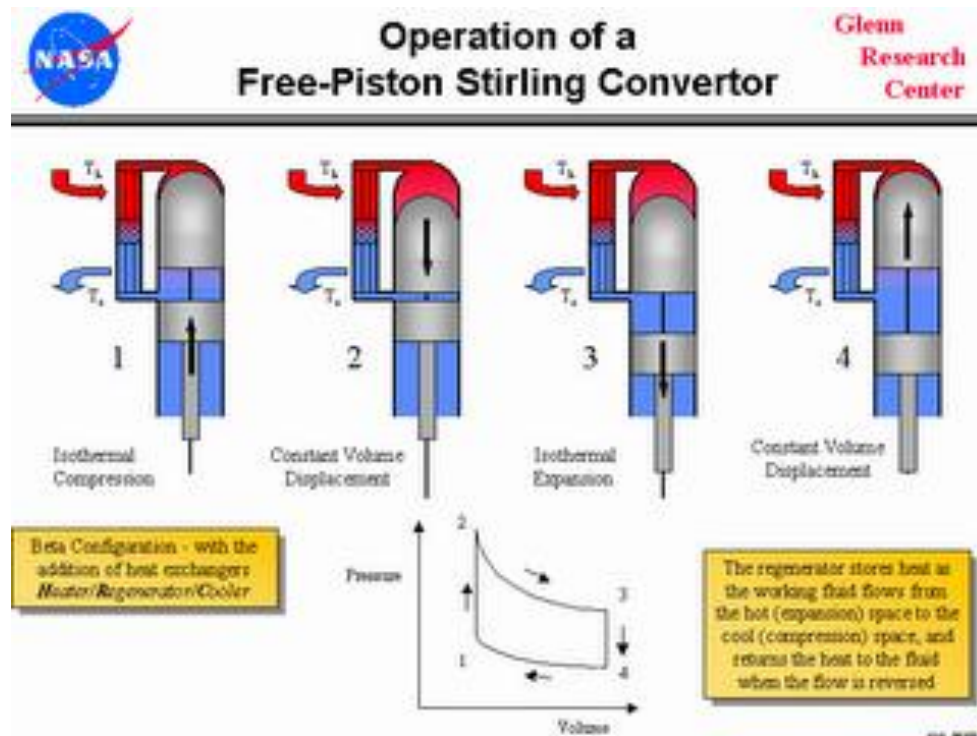


Figura 2.8. Rappresentazione del ciclo di lavoro

I principali vantaggi di un motore Stirling *free-piston* sono l'elevata efficienza, la relativa semplicità costruttiva e di funzionamento, la presenza di poche parti mobili, l'assenza di manovellismi, la possibilità di essere alimentato, come per le altre tipologie di macchine di Stirling, da diversi combustibili ed eventualmente ad energia solare, la possibilità di produrre potenza in un intervallo ampio di temperature delle sorgenti termiche, l'elevata affidabilità, l'assenza di perdite del gas di lavoro, la possibilità di realizzazioni in intervalli di potenza da qualche W alle decine di kW. La minore usura dei componenti rispetto ad un analogo motore con manovellismo è dovuta all'assenza di forze laterali agenti sul pistone e displacer, ad eccezione eventualmente del peso proprio dei componenti, nel caso in cui l'asse non sia verticale. A questi indubbi vantaggi si contrappone la difficoltà progettuale di un motore in cui il moto dei vari componenti non è stabilito a priori da un manovellismo che ne imponga la legge di variazione reciproca, e per cui successivamente si possa disegnare la macchina ottimizzandone le prestazioni, come per le configurazioni classiche di macchine di Stirling. Nel caso del *free-piston* la dinamica delle parti mobili e la termodinamica della macchina

sono fortemente correlate e si influenzano a vicenda: l'ottimizzazione delle prestazioni deve quindi essere ottenuta combinando questi due effetti. Pertanto, oltre alle difficoltà realizzative e progettuali proprie delle macchine di Stirling, nel caso di macchine *free-piston* si aggiunge la difficoltà dovuta all'assenza di un manovellismo che imponga una legge di variazione dei volumi fissa, anche in funzione delle variazioni del carico. Questo fa sì che, a seguito di variazioni di carico o di caratteristiche termodinamiche di funzionamento della macchina, cambi non solo la frequenza di oscillazione dei pistoni, ma anche le loro corse, il loro sfasamento e la loro distanza reciproca. Spetta ad una corretta ed attenta progettazione fare in modo che queste variazioni non comportino penalizzazioni delle prestazioni della macchina. In definitiva quindi, si può dire che il motore Stirling *free piston* può essere un'ottima alternativa, per molti versi anche migliore, al motore a combustione interna, a patto di progettare e dimensionare la macchina in maniera corretta per una specifica applicazione su un autoveicolo.

2.3.4. Gestione delle sorgenti energetiche a bordo veicolo

L'ambito su cui è maggiore la mole della ricerca ingegneristica è quello legato alle modalità con cui possono essere sfruttati gli organi di propulsione. Studiare logiche di controllo che possano garantire maggiori prestazioni alle vetture è possibile attraverso la modellazione numerica dell'intero sistema elettromeccanico, e consente di condurre simulazioni con costi contenuti [16]. Le attuali auto ibride in commercio, rappresentate nella quasi totalità da soluzioni di tipo parallelo, o comunque di tipo misto serie più parallelo, sono dotate di logiche di controllo che contemplano l'uso della modalità puramente elettrica per percorsi decisamente limitati. Le batterie, di modesta entità perché di peso spesso ingente, sono montate in misura contenuta e svolgono il compito di coprire il transitorio di avviamento del veicolo: agiscono quindi solo a basse velocità e per breve tempo. L'avvento di soluzioni ai polimeri di litio consente di far svolgere un ruolo più importante alla parte puramente elettrica. Si presentano quindi almeno due alternative, anche pensando alla configurazione innovativa studiata in questa tesi:

- impostare la propulsione come incentrata sul blocco motore CI e generatore, ma facendo in modo che lavorino solo in un intervallo limitato. Fuori da questo intervallo, sia ai bassi regimi che alle alte velocità, interviene la batteria a coprire le richieste di potenza;
- al contrario utilizzare la spinta elettrica come dominante, fissare un range del SOC (*State Of Charge* delle batterie), facendo in modo che, quando si esce da questo, il generatore assuma il compito di fornire la potenza alle motoruote.

Nel secondo caso, che è decisamente quello di maggiore interesse e di maggior potenzialità per il futuro, si presentano poi varie alternative sul ruolo da dare al generatore: relegarlo alla semplice funzione di supplenza del pacco batteria o invece dimensionarlo in modo tale che possa svolgere una parte attiva anche nella ricarica dei sistemi di accumulo. Il compito di caricare la batteria potrebbe garantire, senza necessità di apposite soste, più cicli di pura trazione elettrica. Logiche di questo genere devono comunque tenere in considerazione le dimensioni ed i pesi dei componenti, che spesso sono complementari, nonché i costi, non solo in termini economici, ma anche in fatto di emissioni.

2.4 Hub Motor e In Wheel Motor

Il settore che forse desta il maggiore interesse della ricerca nel campo dei veicoli elettrici d'avanguardia, è quello che si dedica all'inserimento degli azionamenti direttamente nelle ruote ([17] [18]). I motori elettrici presentano una maggiore predisposizione ad essere inseriti nel volume interno dei cerchi rispetto a quanto possa essere possibile con altri tipi di propulsori. Il fatto stesso di poter accoppiare con la ruota l'indotto o l'induttore, a seconda della configurazione scelta, costituisce uno spunto interessante.

Le soluzioni adottabili sono molteplici, poiché, non necessitando di alberi di trasmissione, la trazione può essere spostata dall'asse anteriore a quello posteriore (o viceversa) in maniera del tutto arbitraria. Di conseguenza, anche la soluzione della trazione integrale non presenta

complicazioni di sorta. In aggiunta a ciò, creare motori indipendenti permette di avere prestazioni dinamiche molto elevate: gli azionamenti elettrici sono contraddistinti da costanti di tempo decisamente inferiori a quelle della maggior parte dei motori endotermici e consentono di attribuire ottime doti di accelerazione alle vetture. Al contrario di ciò che succede per avere le quattro ruote motrici sulle attuali vetture spinte da motori a combustione interna, senza l'aggiunta di complessi sistemi di riduttori o differenziali, che diminuiscono il rendimento globale, è possibile avere diverse velocità per ciascuna ruota.

La maggior parte vantaggi sono legati alla possibilità di rimpiazzare la trasmissione meccanica con quella *by wire*, con un considerevole guadagno in termini di peso, ma anche di efficienza. Di contro va considerato il fatto che una diminuzione della componente trasmissiva del corpo vettura va pagata in aumento delle masse non sospese; queste ultime richiedono un adeguato controllo per non compromettere la dinamica di marcia.

La classe di motori che forse meglio si presta all'operazione di inserimento nelle ridotte dimensioni dei cerchi è probabilmente quella degli azionamenti brushless. Compattezza, peso limitato, grazie ad elevati valori di coppia per unità di massa e di volume (si veda il paragrafo 2.2.2), velocità massime sufficienti alla funzione fanno propendere per questa scelta. Le problematiche, come intuibile, non mancano: è necessario progettare sistemi di frenatura specifici, con scarsi ingombri, ma potenze adeguate. A seconda della richiesta di coppia possono essere necessari sistemi di raffreddamento diversi da quello ad aria. Questo comporta lo studio di un layout funzionale che permetta la corretta alimentazione dei liquidi refrigeranti di tutte le motoruote.

Una rappresentazione schematica e complessiva di quale potrebbe essere l'assemblaggio di un *in wheel motor* è riportato in Figura 2.9. In questo caso il motore brushless è munito di rotore esterno per minimizzare gli ingombri. Come visibile, la cavità che si viene a creare all'interno dello statore può permettere l'alloggiamento, oltre che dell'albero, anche delle pinze dei freni.

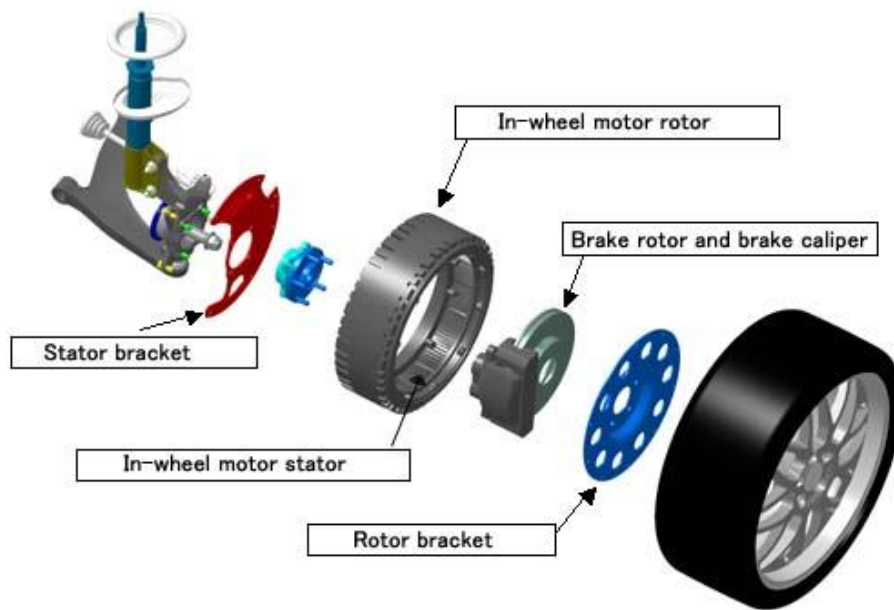


Figura 2.9. Schema di assemblaggio di un Hub Motor

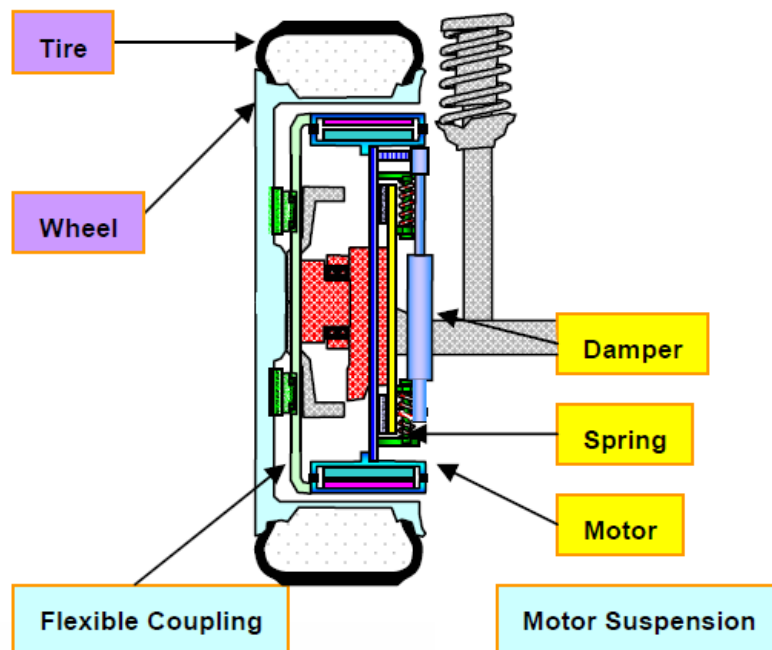


Figura 2.10. Vista in sezione Bridgestone Dynamic Damping In wheel Motor [19]

Esempi di realizzazione di *hub motor* sono presenti solo in forma di prototipo. Le principali aziende interessate sono al momento le case produttrici di pneumatici, in particolare Bridgestone [19] e Michelin [20]. La soluzione della casa giapponese è riportata in Figura 2.10: si è pensato ad un accoppiamento flessibile, costituito da quattro guide a croce (in verde in Figura 2.10.) tra il motore e il cerchio, che consentono di trasmettere la potenza in modo più dolce. Questi accorgimenti permettono di avere una parziale compensazione tra le vibrazioni indotte dal profilo stradale e quelle da imputare al motore. Le interessanti prestazioni di questo prototipo sono riportate in Figura 2.11 e 2.12.

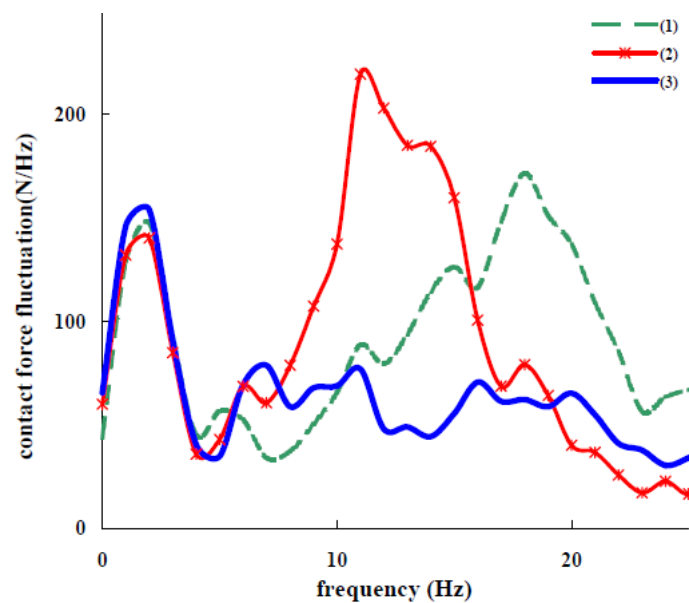


Figura 2.11. Road-holding Bridgestone dynamic-damping in-wheel motor drive system: EV con singolo motore (verde 1), EV con motoruota convenzionale (rosso 2), soluzione Bridgestone (blu 3)

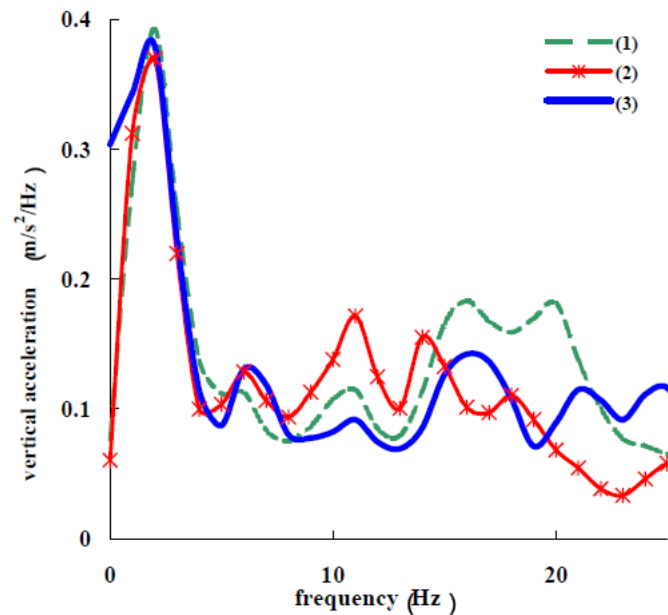


Figura 2.12. Ride-quality Bridgestone dynamic-damping in-wheel motor drive system: EV con singolo motore (verde 1), EV con motoruota convenzionale (rosso 2), soluzione Bridgestone (blu 3)

La concorrente francese ha invece pensato ad una alternativa differente [20]: il motore non è studiato appositamente per essere alloggiato nella ruota, sfruttandone tutto l'ingombro, ma ha dimensioni contenute (si veda la Figura 2.13). Nel volume lasciato libero sono stati inseriti un sistema di sospensioni attive e l'azionamento necessario al loro controllo. Rispetto alla soluzione Bridgestone, quella della Michelin è quindi più articolata del punto di vista meccatronico. La casa transalpina ha anche realizzato un concept, Michelin *Hy-Light*, delle dimensioni poco maggiori di una microcar, munito di questo tipo di ruote.

Anche la Siemens ha avviato un progetto il cui primo prototipo è costituito dall'*eCorner* (Figura 2.14), che sembra una via di mezzo tra quello Bridgestone e quello Michelin: il motore occupa tutto il volume interno del cerchio, ma in esso sono alloggiati anche i sistemi di controllo attivo delle vibrazioni. Lo spunto più interessante è costituito dall'impostazione di localizzare anche la parte di controllo del moto dell'azionamento elettrico all'interno della ruota stessa.

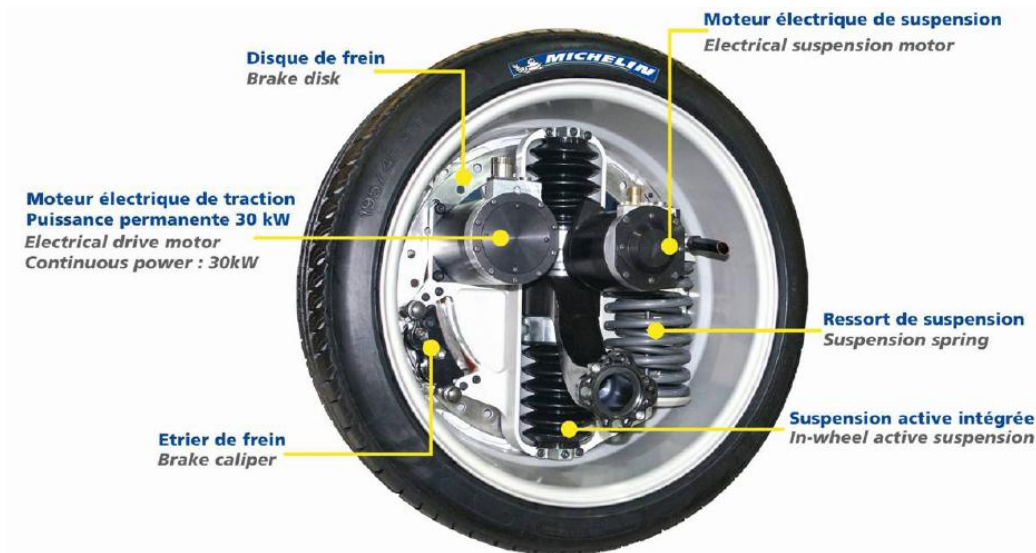


Figura 2.13. Michelin Active Wheel

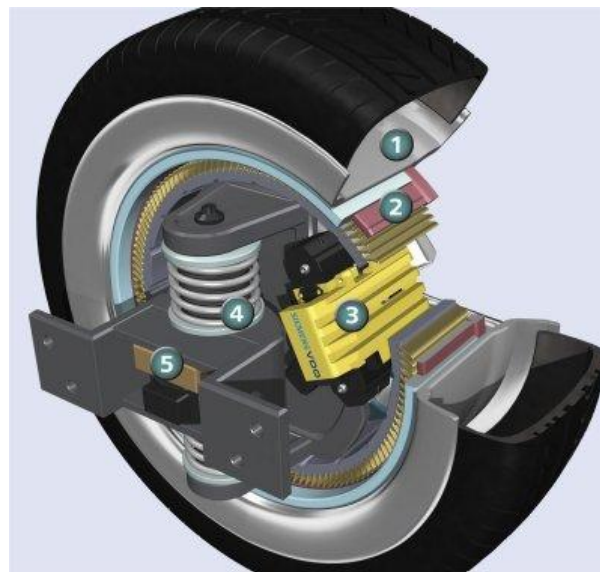


Figura 2.14. Siemens eCorner: 1- wheel rim; 2- wheel rim; 3- electronic wedge brake; 4- active suspension; 5- electronic steering

Le case automobilistiche che si sono occupate di sviluppare dei progetti di veicolo completi, che montino *hub motor* o *in wheel motor*, sono Mitsubishi, Volvo e Ford.

Mitsubishi ha provato ad applicare il suo modello di *in wheel motor* ad un concept, la CT, con quattro ruote motrici.

Volvo ha invece realizzato un prototipo ibrido *Plug-In*, la *ReCharge* [21], che si presenta come una variante sul modello della C30. Il layout del *drivetrain* è quello di Figura 2.15. La casa svedese dichiara prestazioni invariate rispetto al modello già in commercio (0-100 km/h in 9", velocità massima di 160 km/h), con consumi di circa 5,5 l per 100 km. Il progetto è stato realizzato in collaborazione con la PML Flightlink [22], che con la sua soluzione *Hi-Pa Drive* ha equipaggiato anche i SUV Ford.

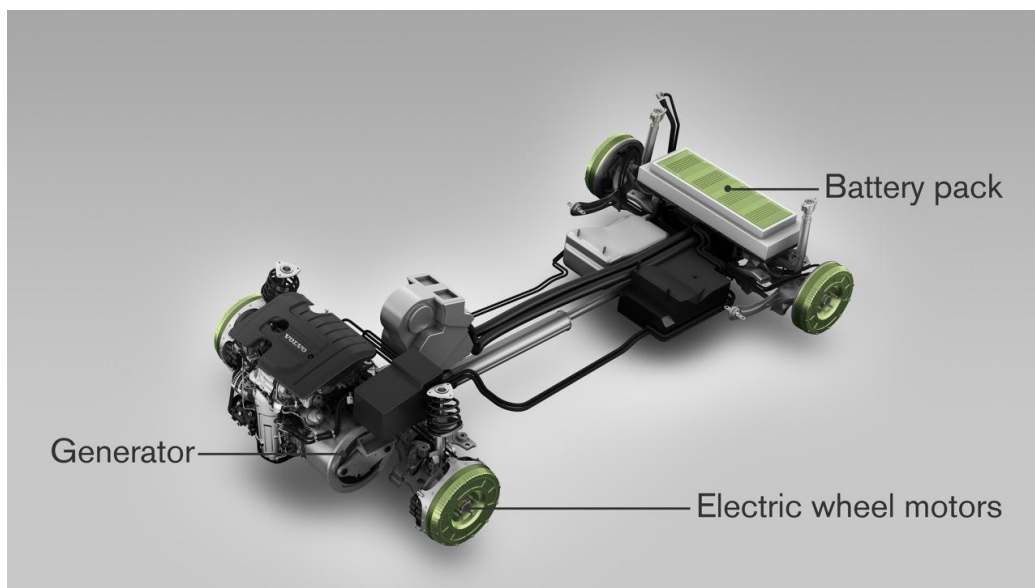


Figura 2.15. Drive Train Volvo ReCharge [21]

A livello di prototipo anche FIAT ha in corso un progetto integralmente ecologico, rappresentato dalla PHYLLA. La vettura, pensata come una piccola *city car*, presenta quattro ruote indipendenti con motori *on board*, ognuno dei quali connesso ad un riduttore, in modo da eliminare la criticità rappresentata dall'elevata coppia di spunto da garantire. Particolare

anche l'uso di pannelli solari flessibili e di spessore contenuto, che possono essere più agilmente collocati sul frontale e sul tetto, senza porre limiti al design. La propulsione dovrebbe essere ibrida, con un possibile impiego dell'idrogeno e quindi di celle a combustibile. L'autonomia in elettrico dovrebbe arrivare ai 220 km in città (con riferimento al ciclo ECE), mentre la velocità massima dichiarata è di 130 km/h. La PHYLLA è comunque stata pensata per un impiego principalmente urbano, per questa ragione monta un motore da 27 kW e dimensioni contenute, con due soli posti e scarsa capacità di carico.



Figura 2.16. Prototipo FIAT PHYLLA [22]

Capitolo III

Dimensionamento dei componenti

3.1 Scelta del veicolo di riferimento

La progettazione di un'automobile copre differenti rami dell'ingegneria: solo per citarne alcuni l'aerodinamica, nella quale il design ha un ruolo importante, la dinamica del veicolo, che influenza la sicurezza ed il comfort di marcia, l'energetica del sistema di propulsione, a cui sono connessi i consumi. In questa sede si è focalizzata l'attenzione sull'ultimo ambito. L'obiettivo che ci si prefigge è quello di realizzare una vettura che non sia un prototipo, ma che possa divenire un modello realizzato su larga scala. Per questa ragione si è pensato di operare una scelta tra i veicoli oggi in circolazione, per adottarne uno sul quale apportare le modifiche necessarie a renderlo un ibrido di tipo serie, spinto da quattro motoruote indipendenti.

Gli itinerari urbani sono quelli su cui la propulsione elettrica è oggi considerata come una valida alternativa alle propulsioni classiche. Questo aspetto incide sul fatto che si sia sviluppato questo lavoro su un veicolo del segmento B, quale il modello FIAT Panda 1100. Questa vettura ha un peso limitato, e quindi si considera che abbia un minore consumo

energetico rispetto a vetture di taglia superiore. Sulla base di questa scelta si è realizzato il progetto di un modello ibrido serie equipaggiato con quattro motoruote indipendenti. Il dimensionamento degli organi necessari per garantire la trazione della vettura, in modo che essa possa avere prestazioni e caratteristiche concorrenziali rispetto agli altri veicoli presenti sul mercato, viene effettuato utilizzando tecnologie presenti e già ampiamente sviluppate, con un'attenzione particolare rivolta alla semplicità realizzativa. Questo lascia inevitabilmente dei margini per ulteriori sviluppi futuri per ciò che riguarda i singoli componenti, dai motori più performanti alle batterie con caratteristiche sempre migliori. Si otterrà quindi un primo dimensionamento del veicolo, che possa quindi essere un punto di partenza per studi a venire.

Per rendere ibrida la vettura tradizionale è necessario operare nel seguente modo:

- eliminare gli organi meccanici che non sono più necessari, ed inserire i motori elettrici nelle ruote e gli altri organi necessari (cfr § 3.2);
- dimensionare tutte le componenti che devono essere montate a bordo per garantire la propulsione (cfr § 3.3).

3.2 Alleggerimento del corpo vettura

Le modalità innovative con cui si vuole rendere ibrido il veicolo permettono di modificare il layout classico di un'auto in due direzioni. In primis l'aggiunta di un azionamento elettrico per garantire il moto, per le caratteristiche di coppia che questo tipo di propulsore presenta, fa sì che non sia più necessaria la presenza di un cambio di velocità, indispensabile per ogni mezzo spinto da un motore a combustione interna. L'eliminazione di un sistema di marce rende inoltre privo di utilità tutto l'apparato della frizione. Secondo aspetto vantaggioso è l'ubicazione del motore all'interno di ogni singola ruota, che rende possibile il moto autonomo di ciascuna di esse, senza l'inserimento di un differenziale. Si noti che questo porta ad un aumento della sicurezza di guida, poiché, a patto di non aumentare in maniera

eccessiva la massa non sospesa, si può controllare autonomamente ogni ruota, a seconda delle condizioni in cui essa si trova.

Le considerazioni appena fatte permettono di togliere le masse riportate in Tabella 3.1, nella quale sono riportati anche valori di alcune grandezze caratteristiche della vettura in esame.

Si ponga attenzione al fatto che anche il motore endotermico è da considerare come un elemento da asportare: il suo rapporto peso/potenza = 2.25 [kg/kW] è infatti elevato. Il peso è un fattore critico in questa sede e ciò suggerisce di ricercare una soluzione alternativa per il motore CI da montare a bordo (cfr § 3.3.2). Analoghe considerazioni andrebbero fatte per il serbatoio, che potrebbe essere sostituito con uno di taglia inferiore: le batterie infatti costituiscono una quota di energia stoccata a bordo aggiuntiva rispetto a quella di un veicolo tradizionale e permettono di contenere la quantità di carburante a parità di autonomia garantita. Non è però noto il consumo al chilometro equivalente (somma di quello di combustibile ed energia elettrica) per il veicolo che si sta progettando, perciò è difficile ridurre la taglia del serbatoio in maniera sensata. In prima approssimazione questo dato è stato lasciato immutato, ma una volta dimensionate tutte le componenti e verificate le prestazioni del mezzo, è possibile effettuare correzioni con cognizione di causa.

Potenza massima	40 kW
Coppia massima	88 Nm a 2750 rpm
Massa totale	840 kg
Capacità del serbatoio	35 l
Velocità massima	150 km/h
Cx·S	0.6738 m ²
Massa del differenziale ¹	4.5 kg
Massa del serbatoio ¹	5.095-7.00 kg
Massa della frizione ¹	3.545 kg
Massa del cambio ²	31.00-40.00 kg
Massa del motore	90 kg

Tabella 3.1. Dati principali della FIAT Panda (il modello di riferimento è un 1100 cc)

3.3 Dimensionamento dei componenti

Epurato il corpo vettura degli organi meccanici superflui come descritto nel precedente paragrafo, si passa alla scelta dei componenti adottati in loro sostituzione. Con maggior dettaglio ci si prepone di trovare:

¹ Questi valori variano a seconda del fatto che si stia considerando la massa dell'organo in questione montata sull'auto di serie, oppure il suo ricambio; in particolare, la differenza è dovuta al diverso materiale utilizzato per i ricambi, rispetto a quello per i pezzi di serie. I ricambi sono in generale più pesanti perché sono costituiti da materiali che hanno caratteristiche leggermente inferiori rispetto a quelli utilizzati per gli organi "di serie". Per quanto riguarda la frizione ed il differenziale, la differenza tra i due valori di massa è di pochi grammi, per cui si considera un solo dato; non è così invece per il cambio ed il serbatoio. In generale, in questa trattazione, si considera il valore più elevato di massa

² La massa del cambio varia invece a seconda del fatto che sulla vettura sia presente o meno l'ABS. In questo caso si considera la versione con ABS, e questo porta quindi a considerare il cambio con una massa maggiore.

- un pacco batterie come sistema di accumulo;
- un nuovo motore endotermico di buon rapporto peso/potenza da accoppiare con un azionamento elettrico che funzioni da generatore.

Al termine di queste operazioni si potrà passare alla

- progettazione della singola motoruota.

Il progetto vuole realizzare il veicolo più performante possibile dal punto di vista energetico, nel rispetto dei vincoli imposti dal modello che si è assunto come riferimento.

Per avere un'idea di quale sia il layout del veicolo una volta reso ibrido serie, con le quattro motoruote indipendenti, si faccia riferimento alla Figura 3.1. Sono riportati tutti i componenti che devono trovare posto a bordo, con il tipo di connessione che hanno l'uno con l'altro. Da notare come i collegamenti elettrici (in doppia linea blu) siano presenti in misura maggiore rispetto a quelli meccanici (in rosso). Conseguenza di questo fatto è un notevole aumento del rendimento complessivo del sistema, poiché il bus elettrico gode di un'efficienza decisamente superiore a quella di una serie di giunti meccanici. Un'altra prerogativa del *drive by wire* è la flessibilità: un cavo elettrico ha infatti minore ingombro e rigidità rispetto ad un albero meccanico e non necessita perciò forzatamente di un alloggiamento dedicato. Infine è palese il guadagno che si ricava in quest'ambito per quanto riguarda il peso.

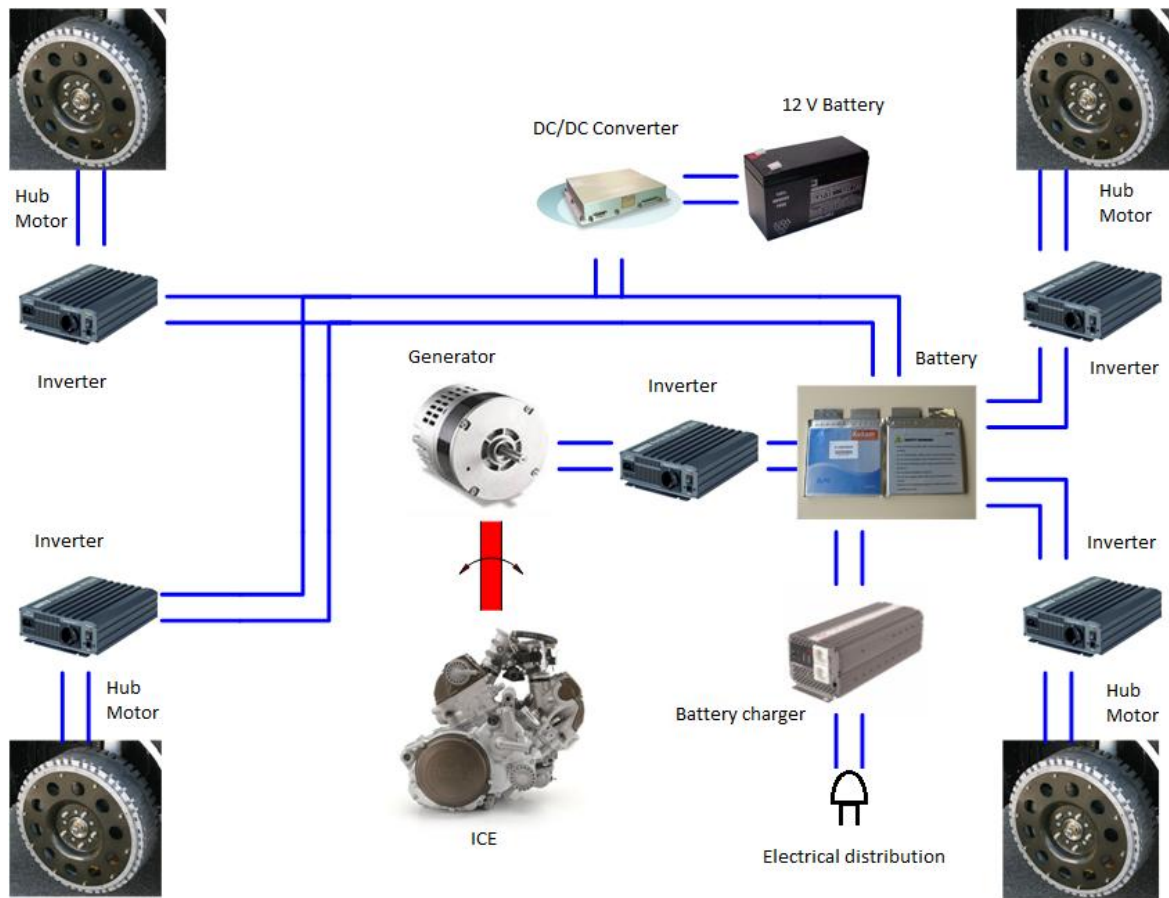


Figura 3.1 Schema complessivo del veicolo ibrido

Prima di occuparsi del dimensionamento, bisogna stabilire quali siano le prestazioni che si richiedono all'autoveicolo, in modo che esso possa essere concorrenziale con le altre vetture della stessa taglia. Si sono quindi fissati i seguenti parametri.

Velocità massima	150 km/h
Accelerazione iniziale	4.1 m/s ²
Autonomia in puro elettrico	40 km
Autonomia in endotermico	614 km

Tabella 3.2. Prestazioni richieste al veicolo ibrido serie con configurazione innovativa

I valori indicati in Tabella 3.2 sono analoghi a quelli che contraddistinguono il veicolo di serie preso a modello, ad eccezione dell'autonomia in propulsione elettrica, che viene quantificata in 40 km come valore ragionevole degli spostamenti in ambito urbano.

Il dato dell'autonomia a propulsione endotermica è calcolato considerando i consumi in un regime misto, pari $5.7 \frac{l}{100 km}$. Un risultato soddisfacente potrebbe essere anche di soli 574 km, che sommati ai 40 km in elettrico garantirebbero una percorrenza complessiva equivalente a quella del veicolo di serie.

Nel dimensionare le sorgenti energetiche, batterie e gruppo motogeneratore, si focalizza l'interesse principalmente su due grandezze: energia e potenza. Ai sistemi di accumulo è richiesto di stoccare al proprio interno la quantità di energia necessaria per percorrere una distanza pari all'autonomia di progetto, valutando poi il picco di potenza fornito. L'ICE ed il generatore elettrico devono invece assicurare la potenza per sviluppare le prestazioni dinamiche prefissate. Energia e potenza sono entrambe funzioni della massa che si deve muovere: questa non è a priori nota, ma dipende dal tipo di componenti scelti. Il diagramma di Figura 3.2 può chiarire le modalità con cui si procede nel dimensionamento. Si valuta inizialmente quale sia la dimensione del pacco batterie necessario per muovere il veicolo nella configurazione di serie, ipotizzando un consumo di energia elettrica. Si aggiunge questa massa all'automezzo, e si ricerca un nuovo motore endotermico da accoppiare al generatore. Si dimensionano quindi le quattro motoruote, si aggiungono all'abitacolo, mentre si tolgono le componenti meccaniche non più necessarie. Per il veicolo così ottenuto si deve verificare che le prestazioni siano quelle di Tabella 3.2, o in altri termini che le ipotesi fatte sui consumi energetici e sui carichi agenti sul mezzo siano corretti.

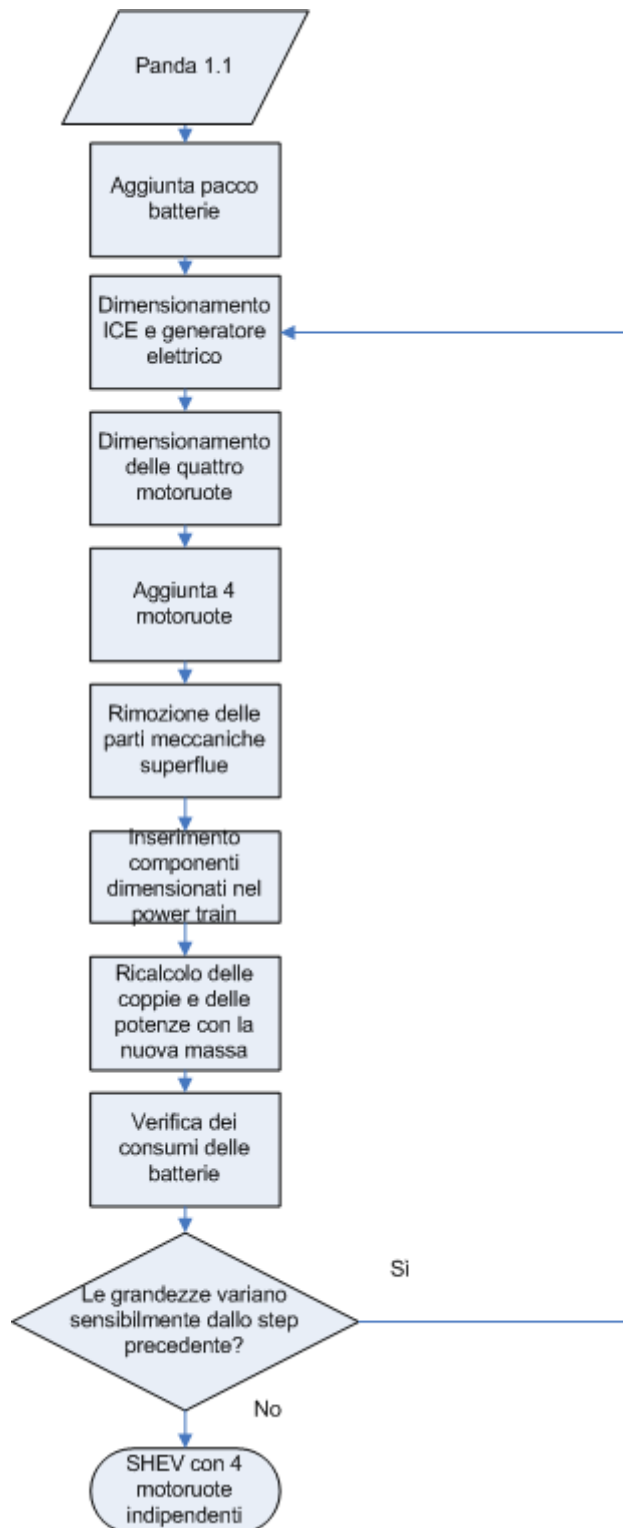


Figura 3.2 Diagramma di flusso del processo di ibridizzazione di un modello Panda 1.1

3.3.1 Dimensionamento del pacco batterie

Come primo passo si identifica il pacco batterie da montare a bordo della vettura, per poter avere un'autonomia in puro elettrico pari a 40 km. Si sceglie la tipologia ai litio-polimeri poiché, in aggiunta alle caratteristiche riportate in precedenza (cfr. § 2.1.4), hanno una grande energia specifica e quindi, a parità di energia richiesta, una massa minore. Il dimensionamento del pacco batterie si effettua sulla base della capacità che esso deve garantire. Per risalire al valore di capacità che corrisponde all'autonomia desiderata, è necessario formulare un'ipotesi sul consumo di energia elettrica per chilometro. Un veicolo analogo, ma di massa maggiore, spinto da un motore asincrono, quindi a minor rendimento rispetto ai brushless adottati in seguito (cfr. § 3.3.3 e 3.3.4), presenta un consumo di 0.16 kWh/km per un ciclo reale: si assume questo come dato di partenza per il dimensionamento, attendendosi però consumi finali più contenuti, anche perché, oltre alle caratteristiche già menzionate, in questo caso si elimina la trasmissione meccanica, che ha un rendimento inferiore rispetto alle parti elettriche presenti sulla vettura in esame. Dimensionando le batterie a partire da un valore di consumo che è sicuramente maggiore rispetto a quello effettivo (si verifica questo nel Capitolo V), si garantisce ampiamente l'energia necessaria per coprire l'autonomia di progetto. Si effettua questa scelta anche perché si pensa che, in questo modo, il sistema di accumulo possa garantire valori elevati anche in termini di picchi di potenza espressi dalla vettura in fase di accelerazione in puro elettrico. Questa scelta verrà verificata nel Capitolo V. Per prolungare la vita utile delle batterie è consigliabile non giungere mai ad un livello di carica nullo: in quest'ottica si fissa una soglia minima del 20%. Di conseguenza, l'energia impiegata per coprire i 40 km previsti come autonomia di progetto in puro elettrico, dovrà corrispondere all'80% dell'energia totale presente (ciò corrisponde a non scaricare le batterie oltre il 20% del loro stato di carica - SOC). Con questa precisazione è possibile scrivere:

$$energia\ necessaria = \frac{consumo \left[\frac{kWh}{km} \right] \cdot autonomia\ richiesta\ [km]}{0.8} = 8\ kWh \quad (3.1)$$

Si considera poi che all'interno di una vettura è necessario avere una tensione in continua che sia all'incirca pari a 250 V e quindi si fissa a questo valore la tensione nominale. Dalla conoscenza del valore di tensione di un elemento ai litio-polimeri, pari a 3.7 V, si determina, per arrotondamento all'intero successivo, il numero di elementi necessari:

$$\text{numero elementi} = \left(\frac{\text{tensione nominale vettura [V]}}{\text{tensione singola cella [V]}} \right)^+ = 68 \text{ elementi} \quad (3.2)$$

Da qui si calcola la capacità che deve avere il pacco batterie considerato:

$$\begin{aligned} \text{capacità necessaria} &= \frac{\text{energia necessaria [kWh]}}{\text{numero elementi} \cdot \text{tensione singola cella [V]}} = \\ &= 31.8 \text{ Ah} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Con riferimento ad un produttore di batterie ai litio-polimeri [23], si cerca il pacco batterie con una capacità pari o superiore a quella trovata in precedenza, nella categoria “alta potenza”. La motivazione di questa procedura è giustificata dal fatto che, in generale, tutte le batterie al litio hanno già una energia specifica adeguata, e con questa scelta si garantisce al sistema una grande potenza di trazione anche in partenza, con il solo sistema elettrico. Sempre con riferimento alla fonte citata, le alternative in commercio sono pacchi batterie da 31 o da 40 Ah. Si sceglie la seconda possibilità, in modo da garantire per intero l'autonomia richiesta e per far fronte senza problemi ad un rendimento delle batterie che, per quanto alto, non sarà totalmente unitario. Di seguito si calcola l'energia effettivamente disponibile, avendo quindi adottato batterie ai litio-polimeri, di capacità pari a 40 Ah.

$$\begin{aligned} \text{energia disponibile} & \\ &= \text{capacità [Ah]} \cdot n^\circ \text{ elementi} \cdot \text{tensione singola cella [V]} = \\ &= 10.064 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Al nuovo dato di energia disponibile corrisponde quindi una autonomia di progetto di

$$\text{autonomia} = \frac{\text{energia disponibile [kWh]} \cdot 0.8}{\text{consumo} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right]} = 50.32 \text{ km} \quad (3.5)$$

Al termine delle simulazioni del Capitolo V, si riscontrano dei consumi pari a circa 0.1 e 0.113 kWh/km rispettivamente per il ciclo ECE e per un ciclo urbano reale. Dal punto di vista energetico, i sistemi di accumulo sono perciò sovradimensionati: questo permette di avere una maggiore autonomia in elettrico, aspetto positivo per un ibrido Plug-In che può così sfruttare di più l'energia a basso costo fornita dalla rete. Si verifica inoltre che la potenza di picco fornita dalle batterie in fase di accelerazione assume valori rilevanti, garantendo quindi piene prestazioni anche in puro elettrico. Per questi motivi si mantiene, per le batterie, il dimensionamento effettuato.

Kokam™		<i>Global Leader in Power Solution</i>
Cell Specification		
● Typical Capacity ¹⁾		40.0 Ah
● Nominal Voltage		3.7 V
● Charge Condition	Max. Current	80.0 A
	Voltage	4.2V ± 0.03 V
● Discharge Condition	Continuous Current	200.0 A
	Peak Current	400.0 A
	Cut-off Voltage	2.7 V
● Cycle Life [@ 80% DOD] ²⁾		> 800 Cycles
● Operating Temp.	Charge	0 ~ 40 °C
	Discharge	-20 ~ 60 °C
● Dimension	Thickness (mm)	10.7 ± 0.5
	Width (mm)	215 ± 2.0
	Length (mm)	220 ± 2.0
● Weight (g)		1,100 ± 40

1) Typical Capacity : 0.5C, 4.2~2.7V @25°C

2) Voltage range : 4.15V ~ 3.40V

Tabella 3.3: Descrizione dei dati della singola cella [23]

Dalla Tabella 3.3, si ricava una massa totale del pacco batterie pari a

$$\begin{aligned} \text{massa batterie} &= \text{numero elementi} \cdot \text{massa singolo elemento} [kg] = \\ &= 74.8 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.6)$$

da cui deriva che la massa totale risulta essere pari a

$$\begin{aligned} m_{\text{auto}} &= \text{massa auto serie} [kg] + 200 \text{ kg} + \text{massa batterie} [kg] = \\ &= 1114.8 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.7)$$

I 200 kg che compaiono nella (3.7) corrispondono al peso di due passeggeri più un bagaglio.

3.3.2 Dimensionamento della propulsione primaria

Il motore endotermico viene dimensionato in modo che la sua potenza nominale garantisca la potenza massima richiesta per la propulsione del veicolo, nelle condizioni per esso più sfavorevoli, e tenendo conto del rendimento della parte elettrica. In questo modo, il motore endotermico può garantire continuamente il moto del veicolo alla sua massima velocità. Sul dimensionamento incidono quindi in maniera diretta i carichi agenti, che si possono classificare in linea di massima come:

- Forza d'inerzia: $F_{in} = m \cdot a;$ (3.8)

- Forze d'attrito: $F_{att} = \mu \cdot m \cdot g;$ (3.9)

- Forza aerodinamica: $F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v^2;$ (3.10)

Le grandezze caratteristiche impiegate nelle (3.8)-(3.10) possono essere trovate nelle tabelle 3.1 e 3.2.

Le forze così definite hanno andamenti differenti. Allo spunto prevale la componente di inerzia, che si attenua però con l'avvicinarsi della velocità di crociera, in quanto decresce il valore di accelerazione. Le forze di attrito sono funzione di parametri debolmente variabili con la velocità: in questa trattazione vengono assunte perciò costanti. Infine le forze

aerodinamiche, che crescono invece rapidamente e presentano il massimo in corrispondenza della massima velocità. Da qui si ricava che, con m corrispondente al valore della massa della vettura, la potenza massima richiesta a regime corrisponde a:

$$P_{max\ rich} = (F_{in} + F_{att} + F_{aer}) \cdot v_{max} = 34.4\ kW = 46.8\ CV \quad (3.11)$$

Noto che la potenza è data dal prodotto dei carichi agenti moltiplicati per la velocità del moto secondo la (3.11), si può considerare come la massima potenza si raggiunga quando si tocca la massima velocità, ossia dove, essendosi esaurito il transitorio di accelerazione, il contributo delle forze inerziali è nullo.

Il valore così trovato non tiene conto del fatto che la catena che congiunge il gruppo motogeneratore alle ruote non presenta rendimento unitario. Nel confronto però con quella che è l'efficienza di una trasmissione meccanica, il comportamento del sistema elettrico nel suo complesso è decisamente positivo. Come valore omnicomprensivo si può assumere un $\eta_{globale}=0.8$. Ne consegue una potenza nominale del motore endotermico pari a:

$$P_{nom} = \frac{P_{max\ rich}}{\eta_{globale}} = 43\ kW \quad (3.12)$$

Il dato, se confrontato con la quello dichiarato per il motore che monta la vettura di serie, è abbastanza plausibile, se si tiene anche in considerazione l'aumento di massa legato alle batterie.

Si può quindi avviare la ricerca di un motore endotermico che presenti delle caratteristiche conformi alle specifiche sino ad ora individuate. Alcune considerazioni preliminari possono focalizzare meglio l'analisi su quelle che sono le soluzioni più adatte. L'ICE in questa situazione non è un elemento a sé, ma lavora in stretta connessione con il generatore elettrico. Se si osserva che la potenza meccanica che questi due elementi devono fornire è esprimibile come il prodotto tra la coppia T e il regime di rotazione Ω , ci si trova, per limiti costruttivi, a dover privilegiare una di queste due grandezze rispetto all'altra. Il motogeneratore è disaccoppiato dalle ruote, ragion per cui non si è particolarmente interessati ad avere alte coppie. Queste dal punto di vista degli azionamenti elettrici,

corrispondono a maggiori ingombri (e conseguentemente a maggiori pesi) rispetto a modelli “veloci” con Ω elevate e momenti d’inerzia contenuti.

Con queste motivazioni, oggetto della ricerca sono stati motori a combustione interna in grado di erogare la potenza desiderata a grandi velocità di rotazione. Oltre a queste specifiche, bisogna sempre tenere a mente la necessità di ridurre il più possibile il rapporto peso/potenza.

I parametri di ricerca appena individuati permettono di limitare il campo di ricerca in due ambiti:

- Motori automobilistici a tre cilindri: presentano in genere potenze non molto elevate, ma l’aggiunta di una turbina può incrementare le prestazioni
- Motori di derivazione motociclistica

La prima delle due alternative presenta l’indubbio vantaggio di essere studiata per un’applicazione su un’automobile ed è contraddistinta da rendimenti mediamente più alti. Nel momento storico attuale però, questa soluzione tecnica patisce un momento di stanca. La difficoltà nel reperire sul mercato dei modelli di questo tipo consiglia di considerare altre alternative.

I motori motociclistici hanno rendimenti mediamente più bassi di quelli automobilistici, ma sono decisamente più compatti, leggeri e possono raggiungere livelli di velocità di rotazione maggiori. Il mercato offre una gamma amplissima e diversificata di modelli disponibili subito. Queste caratteristiche sembrano renderli particolarmente adatti al veicolo ibrido serie con configurazione innovativa che si sta progettando.

L’analisi delle alternative disponibili permette di identificare, in un intervallo che va dai 450 cc ai 600 cc, le cilindrata che erogano potenze intorno ai 40 – 50 kW. Una buona soluzione di compromesso è il modello Aprilia RXV-550, che con la sua massa di 32 kg e la sua potenza erogata di circa 48 kW (65 CV), si contraddistingue per un interessante rapporto peso/potenza. Un aspetto positivo di questa scelta è rappresentato dal fatto che il modello RXV è pensato per usi sportivi e quindi la casa produttrice fornisce, in dotazione con il

motore, anche il software dedicato, che consente molteplici personalizzazioni dei settaggi della centralina. Considerato che il rendimento globale dichiarato è pari a circa il 26%, la possibilità di individuare una mappatura ad hoc per l'impiego su un veicolo ibrido è molto interessante, in quanto permette di raggiungere rendimenti nell'ordine del 30-37%. Questo range corrisponde al valore massimo possibile di rendimento per un motore motociclistico a due cilindri, quattro tempi, come quello in esame [24]. Possibili controindicazioni vanno pesate sul fatto che, nella configurazione in analisi, si lavora ad un regime di rotazione costante (si vedrà in seguito come questo motore abbia anche un carico costante, almeno considerando una tra le più diffuse logiche di controllo per le vetture ibrido serie) adeguatamente scelto intorno al punto di ottimo del motore primo. In questo modo quindi, si riesce a garantire la potenza necessaria alla trazione, con un contemporaneo livello di emissioni conforme alle norme, ed allo stesso tempo con un rendimento globale del motore in linea con le applicazioni motociclistiche attuali. Da notare che in questa applicazione non serve avere un andamento soddisfacente della curva di rendimento per un determinato range di velocità del motore, ma è sufficiente avere un picco di rendimento in corrispondenza del punto di lavoro fissato.

In definitiva, si sceglie di montare un motore motociclistico rispetto a quello di una piccola utilitaria poiché, a fronte di un rendimento leggermente inferiore (per le auto si arriva a rendimenti del 35-40 %, [24]), questo tipo di propulsore garantisce esattamente la potenza necessaria, con una massa tutto sommato limitata ed un regime di rotazione elevato. Si ricorda comunque che, se si volesse scegliere un altro propulsore, tutto il dimensionamento successivo non cambierebbe. La velocità di lavoro Ω si pone uguale a circa 8000 rpm; si sceglie questo valore perché rappresenta un buon compromesso tra l'esigenza di avere una velocità elevata (e quindi una bassa coppia, a parità di potenza) e la necessità di non diminuire la vita del motore, facendolo girare nominalmente ad un regime troppo elevato.

3.3.3 Dimensionamento del generatore

Le specifiche che identificano il generatore sono i risultati ottenuti nel precedente paragrafo.

In particolare si ricerca un azionamento con:

- $P_{nom} \geq 46 \text{ kW}$ Potenza nominale dell'ICE
- $\Omega_{nom} \approx 8000 \text{ rpm}$ (837 rad/s)
- $T_{nom\ gen} \geq \frac{P_{nom\ ICE} \cdot \eta_{generatore}}{\Omega_{endotermico}} = 52.24 \text{ Nm}$

I vincoli così imposti sono finalizzati ad avere una situazione di lavoro ottimale per il gruppo motogeneratore nel suo complesso. Il tipo di motore da adottare può essere scelto tra uno dei gruppi classificati nel Capitolo 2 (cfr § 2.2). Una buona soluzione può essere costituita dal sincro brushless, che presenta alti rendimenti, ma anche ingombri ridotti e pesi contenuti.

In questo senso, la migliore alternativa individuata nella ricerca di mercato è il modello Phase TK-112-06, i cui dati sono riportati in Tabella 3.4. La coppia nominale di questo motore è di 63 Nm e la velocità nominale è pari a 842 rad/s (circa 8040 rpm), anche questo conforme alle specifiche. Questi dati portano ad avere una potenza nominale $P_{nom} = 53.046 \text{ kW}$ (cfr Tabella 3.4).

Anche il peso è complessivamente contenuto e lo si può ottenere come somma delle masse di statore e rotore riportate in Tabella 3.4

$$m_{generatore} = m_{statore} + m_{rotore} = 13.5 + 3.9 = 17.4 \text{ kg} \quad (3.13)$$

	Symbol	TK 170-60-0.6	TK 170-112-0.6	Units
Dati base (indipendenti dall'avvolgimento)				
Coppia nominale, velocità 0, conduzione+convezione, IC 418 1)	Tnc	14	26	Nmrms
Coppia nominale, velocità 0, raffr. ad acqua 2)	Tnw	32	63	Nmrms
Coppia di picco, S6 10% 1)	Tpk	40	74	Nmrms
Coppia massima 3)	Tul	78	117	Nm
Massima velocità strutturale	Pn	3000	3000	rad/sec
Coppia critica di deflussaggio 4)	Pf	6	118	Nm
Costante motore	Tw	1,74	2,70	Nm/sqrt(W)
N. poli	PN	4	4	
Collegamento		Y	Y	
Dati fisici (indipendenti dall'avvolgimento)				
Inerzia rotore	Jm	8	8	mkgm ²
Accelerazione a coppia massima	apk	766,2	9135	rad/s ²
Diametro esterno statore	Dout	170	170	mm
Diametro max foro rotore	Din	65	65	mm
Lunghezza totale statore	Stkout	145	197	mm
Altezza pacco lamiere	Stk	60	112	mm
Massa statore	Msta	9,5	13,5	kg
Massa rotore	Mrot	2,4	3,9	kg
Classe isolamento		Class H - F	Class H - F	
Grado protezione		IP 00	IP 00	
Dati termici (indipendenti dall'avvolgimento)				
Impedenza termica ipotizzata per conv. naturale 1)	Rthc	0,380	0,250	K/W
Impedenza verso il circuito di raffreddamento 2)	Rthw	0,067	0,040	K/W
Capacità termica	Cth	3.990	5.670	J/K
Costante di tempo termica, raffr. convezione 1)	Tc	1.516	1.418	sec
Costante di tempo termica, raffr. acqua 2)	Tw	267	227	sec
Perdite a Tc	LOc	248	378	W
Perdite a Tnw	LOW	1.250	2.096	W
Flusso minimo acqua raffreddamento, ingr. 35 C, Dt 5C	Cfl	7,2	12,0	lit/min
Soglia delle protezioni termiche (PTC)	PTCt	130	130	°C
Dati elettrici (dipendenti dall'avvolgimento)				
Velocità nominale (ginocchio) 5)	wn	860	842	rad/sec
Potenza nominale, raffredd. acqua, vel. ginocchio 6)	Pnw	27,52	53,05	kW
Forza controelettromotrice	Ke	0,38	0,38	Vs
Costante di coppia	Kt	0,65	0,65	Nm/Arms
Coefficiente di temperatura di Ke e Kt	dKe/dT	-0,09	-0,09	%/°C
Resistenza avvolgimento, 20 C	Rw	0,2	0,09	Ohm
Induttanza avvolgimento	Lw	2,10	1,20	mH
Corrente nominale a velocità zero 1)	In0	21,50	39,92	Arms
Corrente nominale a velocità zero 2)	In	51,72	101,83	Arms
Corrente massima 3)	lpk	149,7	224,57	Arms
Frequenza	fn	274	268	Hz
Rendimento a potenza nominale 6)	n	0,96	0,96	

Definizioni:

- 1) Motore montato in carcassa in lega leggera con superficie esterna pari al 500% della superficie dello statore, ambiente 40 C, rame a 120 C.
- 2) Motore raffreddato ad acqua, ingresso acqua 35 C, temperatura rame 120 C
- 3) Coppia a cui il circuito magnetico satura per cui non e' possibile alcun ulteriore sovraccarico
- 4) Coppia al ginocchio a cui corrisponde potenza costante illimitata
- 5) Limite del funzionamento a coppia costante con alimentazione 400 Vac

Tabella 3.4 Dati tecnici del generatore elettrico [25]

3.3.4 Progettazione della motoruota

La progettazione delle motoruote indipendenti è volta a determinare le grandezze elettromeccaniche che esse devono garantire, a partire dai valori di potenza richiesta per l'avanzamento della vettura. Nei paragrafi precedenti si è dimensionato il gruppo motogeneratore ed è quindi ora chiaro qual è la potenza disponibile a bordo della vettura. Questa potenza, che a valle del generatore è elettrica, deve essere riconvertita in meccanica per essere fruibile dalle ruote, per garantire il movimento. La soluzione di ibrido serie classica prevede che un singolo motore compia questa trasformazione di potenza e che poi, mediante opportuni organi di trasmissione, questa sia ripartita sulle ruote motrici.

L'aspetto innovativo di questa tesi è il fatto che all'interno di ognuna delle quattro ruote viene inserito, tramite accoppiamento diretto, un motore elettrico. La potenza meccanica è perciò sviluppata direttamente in corrispondenza dell'utilizzatore, con chiari vantaggi per quello che concerne l'efficienza. In questa trattazione si prevede che le quattro motoruote garantiscano la stessa potenza.

La prima problematica di progetto è la tipologia di motore più adatta ad essere inserita in una ruota. Se per l'intero veicolo il peso rappresenta un parametro critico, limitare questa grandezza per le ruote è questione ancora più stringente. La dinamica del veicolo è infatti influenzata dall'entità delle masse non sospese quali, appunto, le ruote. Ancora una volta il sincro brushless sembra essere la migliore soluzione, in quanto leggero e con rendimento elevato.

Il dimensionamento prende inizio dall'individuazione dei valori di coppia che devono essere garantiti da ogni motore, a partire dal valore di potenza nominale che esso deve garantire (noto dalla 3.11).

$$P_{nom} = 34.410 \text{ kW} \tag{3.14}$$

Questo dato deve essere diviso sul numero di ruote motrici, quindi quattro. La potenza alla ruota è perciò pari a:

$$P_{ruota} = \frac{P_{nom}}{4} = 8.602 \text{ kW} \quad (3.15)$$

La coppia alla massima velocità si trova mediante il rapporto con la velocità di rotazione. Per il calcolo di quest'ultima bisogna fare una prima ipotesi sul raggio della ruota: si assume quello dello pneumatico montato sul modello di serie, pari a circa $r = 0.27 \text{ m}$.

$$\Omega_{max} = \frac{v_{max}}{r} = 154.32 \text{ rad/s} \quad (3.16)$$

Il valore di coppia alla velocità massima è di conseguenza

$$T_{vmax \text{ ruota}} = \frac{P_{ruota}}{\Omega_{max}} = 55.74 \text{ Nm} \quad (3.17)$$

La coppia di spunto è quella che dovrà vincere la forza d'inerzia alla partenza, calcolata in maniera conforme alle prestazioni richieste dalla Tabella 3.2, ossia con un'accelerazione di spunto di 4.1 m/s^2 .

$$T_{spunto \text{ ruota}} = \frac{m_{auto}}{4} \cdot acc_{spunto} \cdot r_{ruota} = 308.52 \text{ Nm} \quad (3.18)$$

Si procede a ritroso. Il legame tra la coppia di spunto e la coppia nominale è espresso mediante un coefficiente denominato “fattore di sovraccarico”. Il suo valore non deve mai essere inferiore ad 1.6 [26], ma raramente si presenta minore di 2. Per l'uso in questione sembra ragionevole porre questo termine pari a 2.5: la verifica che l'entità del coefficiente sia adeguata verrà condotta alla conclusione del dimensionamento.

$$T_{nom \text{ ruota}} = \frac{T_{spunto \text{ ruota}}}{2.5} = 123.4 \text{ Nm} \quad (3.19)$$

A questo punto tutti i valori di coppia sono stati identificati. Si può calcolare in conclusione la velocità angolare nominale:

$$\Omega_{nom} = \frac{P_{ruota}}{T_{nom}} = 69.7 \text{ rad/s} \quad (3.20)$$

Alcune considerazioni preliminari aiutano a comprendere il metodo di progetto. La tipologia di motore montato è come detto quella del sincro brushless; la presenza dei magneti permanenti al posto del circuito di indotto permette di invertire senza grandi complicazioni il rotore con lo statore. Dal punto di vista costruttivo quindi, il motore non si presenterà nella classica configurazione con i magneti posti su un cilindro interno, a costituire la componente in moto, ma viceversa si potrà posizionare lo statore all'interno ed il rotore solidale con il cerchio della ruota. Questa configurazione, tutt'altro che infrequente, permette di avere un minore volume occupato, e conseguentemente un minore peso.

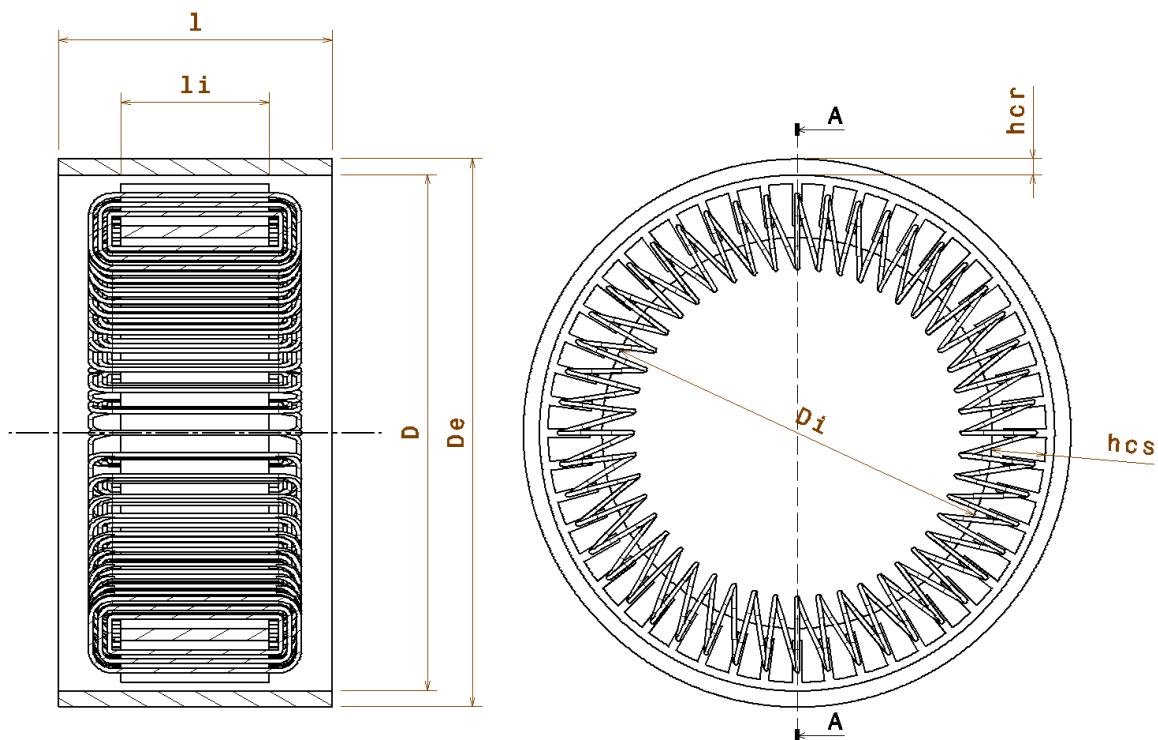


Figura 3.3 Rappresentazione qualitativa del motore brushless con rotore esterno

La progettazione del motore elettrico [26] [27] è strettamente legata ai vincoli dimensionali, poiché andrà inserito all'interno del cerchio della ruota. Inciderà quindi in maniera significativa la misura della corona esterna, rotorica in questo caso (h_{cr} in Figura 3.3), che dovrà essere ragionevolmente contenuta. A questo scopo è necessario ricordare che lo

spessore di suddetta corona è funzione del numero di poli che contraddistingue il motore, nonché delle spire che ciascun polo presenta. Senza voler scendere in un livello di dettaglio che esula dagli obiettivi di questa trattazione, in prima approssimazione si può considerare che un alto numero di poli consente di contenere le dimensioni a cui si è interessati. Per questa ragione si è imposto che il numero di coppie polari fosse pari a $n=16$.

Il metodo più comune per dimensionare un motore elettrico è quello di partire dalla potenza continuativa che la macchina deve fornire (P_d). Questa grandezza, nel caso di una macchina in corrente alternata, si traduce nella potenza convertita da elettrica a meccanica in corrispondenza della velocità nominale Ω_n . A questa velocità sono legati i termini elettrici di pulsazione delle correnti ω_n , frequenza nominale e delle già menzionate coppie polari secondo la relazione

$$\Omega_{nom} = \frac{\omega}{n} = \frac{2\pi f}{n} \quad (3.21)$$

La potenza quindi si può esprimere mediante il prodotto

$$P_d = 3E_n I_n \cos \gamma = T_n \Omega_n \quad (3.22)$$

Si esplicita ora l'espressione della forza elettromotrice f.e.m. come

$$E = U f_a e = U f_a B l v = U f_a B l \Omega \frac{D}{2} \quad (3.23)$$

nella quale f_a corrisponde al fattore di avvolgimento, dipendente dalla disposizione spaziale delle bobine e prossimo all'unità, B corrisponde all'induzione magnetica, U è il numero totale di conduttori ed l la lunghezza del rotore. Si giunge così ad un legame tra f.e.m. e D (il diametro al traferro del cilindro rotorico). La sostituzione della (3.23) nella (3.22) conduce all'espressione

$$P_d = \frac{3U I_n}{2\sqrt{2}} B_M f_a l D \cos \gamma \Omega_n \quad (3.24)$$

Se si introduce ora la grandezza "densità lineare di corrente nominale"

$$A_n = \frac{3UI_n}{\pi D} \quad (3.25)$$

La (3.19) si riscrive, considerando che il valore del termine $\pi f_a/2\sqrt{2}$ è prossimo all'unità, come

$$T_{nom} = A_n \cdot B_m \cdot D^2 \cdot l \cdot \cos \gamma \quad (3.26)$$

Le macchine sincrone possono essere regolate in modo tale che $\cos \gamma \approx 1$ [26]. La relazione (3.26) chiarisce il modo in cui le dimensioni radiale e longitudinale del motore influiscono sulla coppia della motoruota.

Si tratta ora di individuare i valori adeguati da sostituire nelle equazioni sopra riportate. In particolare, i parametri da fissare sono A_n e B_m , in base a questi si possono poi studiare le dimensioni. Per quanto riguarda il primo, il suo valore è influenzato dal tipo di raffreddamento che si sceglie. Le alternative più concrete e frequenti per queste applicazioni sono rappresentate dalla ventilazione forzata, oppure da circuiti idraulici. Con la ventilazione forzata i valori si assestano intorno ai 23000 A/m; l'acqua invece porta un considerevole aumento di questo coefficiente, sino a 45000 A/m. Si verificherà quale soluzione è necessaria.

L'induzione magnetica B_m è stata dedotta da un'analisi comparativa con altre soluzioni già presenti sul mercato: porre $B_m = 0.9$ T è ragionevole in questa trattazione.

Con le ipotesi formulate restano da individuare il diametro rotorico al traferro D e la lunghezza l del rotore. In questo caso non si ha una soluzione univoca, ma è sufficiente rispettare alcuni vincoli:

- il diametro esterno del rotore dovrà essere minore del diametro interno del cerchio;
- la lunghezza del rotore dovrà essere minore dello spessore del cerchio.

La dinamica porta però a fare alcune osservazioni. Delle due dimensioni, quella più critica è il diametro rotorico al traferro D : innanzitutto perché influenza in misura maggiore il volume e quindi il peso. In secondo luogo perché questa misura è proporzionale alla coppia di spunto

da vincere (3.18) ed alla coppia massima che viene fornita dalla motoruota. Da notare che la coppia di spunto è legata al diametro al traferro del cilindro rotorico D tramite la relazione

$$D_{ruota} = D \cdot C + 2 \cdot L \cdot R_a \quad (3.27)$$

in cui C , qui posta pari a 1.4, può essere intesa come il prodotto di una costante K_d , che maggiore D per arrivare al diametro esterno di rotore D_e , e di una costante K_c , che permette di arrivare al diametro del cerchio. I due coefficienti sono il rapporto d'aspetto $R_a = 0.65$ e la larghezza dello pneumatico $L = 0.165$ m, che si intende proporzionale a quella del cerchio. La coppia massima esprimibile dalla motoruota è invece legata alla sua coppia nominale (3.26) - e di conseguenza al diametro D - semplicemente dal fattore di sovraccarico. Si procede quindi ad un'analisi di Break Even Point (B.E.P.) tra la coppia di spunto e quella massima, per determinare il diametro rotorico al traferro che possa portare ad avere il miglior compromesso tra una bassa coppia d'inerzia da fornire, ed un'alta coppia massima esprimibile dalla motoruota. È necessario però esprimere la lunghezza del rotore in funzione del diametro D , in modo rendere anche l'equazione (3.26) funzione di un solo parametro, D appunto. A tal scopo si sono analizzate i valori caratteristici del rapporto l/D per un set di motori per applicazioni di trazione analoghe a quella qui trattata: rapporti frequenti sono nell'ordine dello $0.50 \div 0.52$. Inserita questa condizione, l'espressione della coppia massima diviene cubica in D . La determinazione delle grandezze geometriche di una motoruota avviene in questo modo: si parametrizzano le principali grandezze geometriche rispetto al diametro rotorico al traferro; dopo aver determinato il diametro rotorico, e conoscendo il valore della lunghezza del cilindro rotorico e del numero di coppie polari, si determinano le rimanenti grandezze.

Si possono quindi studiare gli andamenti delle coppie al variare del diametro e in base al tipo di raffreddamento, secondo cui si determina il coefficiente A_n (l'induzione magnetica B_m viene invece supposta sempre la medesima). L'analisi di BEP per la ventilazione forzata è riportata in Figura 3.4

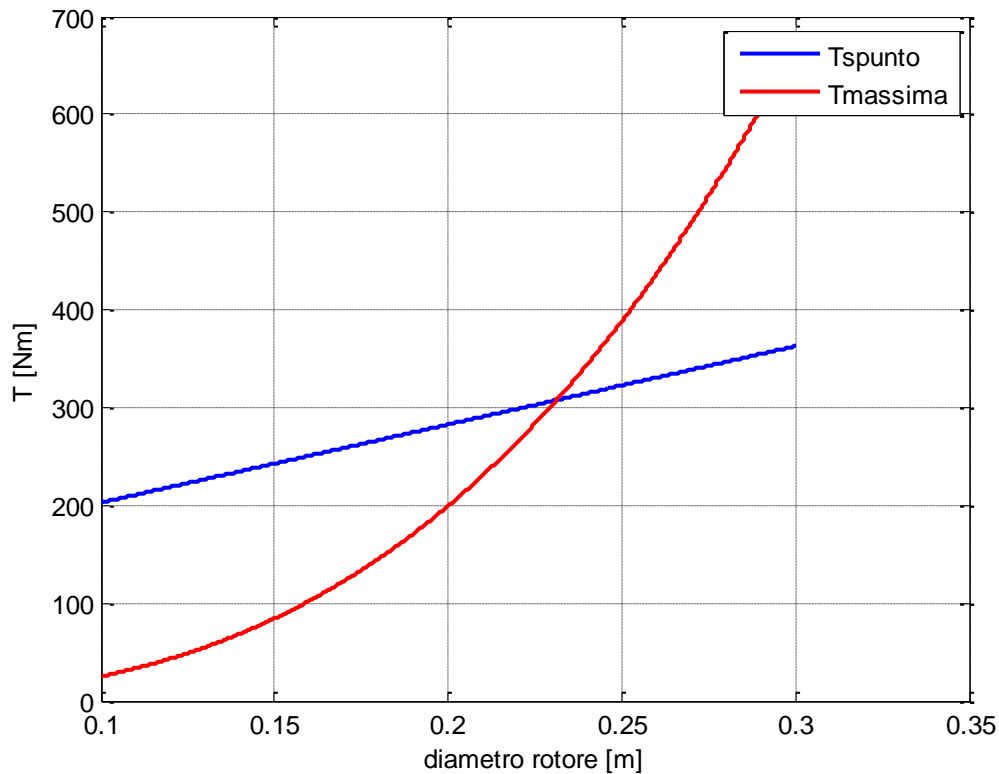


Figura 3.4 Andamento della coppia di spunto e della coppia massima al variare del diametro
 $A_n=23000 \text{ A/m}$

Come risulta evidente dalla Figura 3.4, l'intersezione tra le due curve, che corrisponde al punto di ottimo, è posta prima del diametro limite della ruota, pari a 0.54 m, ed in particolare si trova in corrispondenza di 0.23 m.

La misura ricavata è sufficiente a consentire l'alloggiamento di un motore del diametro trovato, anche tenendo conto dello spessore della corona.

L'aggiunta di un sistema di raffreddamento ad acqua conduce invece alla situazione di Figura 3.5. È così possibile operare un confronto tra il caso in Figura 3.4 e 3.5, per i due differenti valori di A_n .

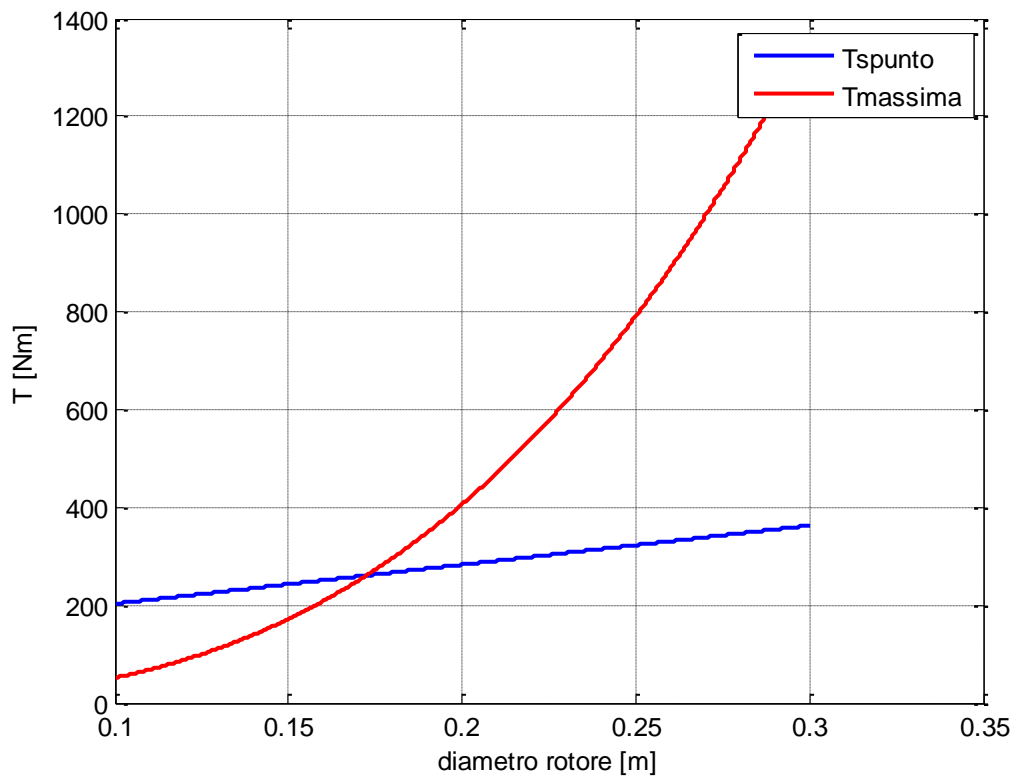


Figura 3.5 Andamento della coppia di spunto e della coppia massima al variare del diametro $A_n=45000 \text{ A/m}$

Un raffreddamento più efficiente consente di ridurre le dimensioni del diametro. I benefici però comportano anche alcune controindicazioni: portare l'acqua all'interno delle quattro ruote richiede un circuito idraulico apposito di non semplice realizzazione. La ventilazione forzata è di più semplice ingegnerizzazione, per cui si sceglie questa soluzione.

Si è così identificato un valore per il diametro rotorico al traferro. Prima di procedere è necessario verificare che la lunghezza del motore sia conforme ai vincoli. Assumendo il rapporto $l/D = 0.52$, si perviene ad un $l = 0.115 \text{ m}$. La spalla del cerchio montato di serie è di 0.165 m ; l'interno avrà una misura utile un po' inferiore (2-3 cm in meno) considerata la sagomatura delle razze. La soluzione trovata è quindi soddisfacente perché sfrutta appieno i volumi disponibili.

La coppia nominale secondo la (3.26) vale, per le dimensioni trovate in precedenza:

$$T_{nom\ ruota} = 125.93\ Nm \quad (3.28)$$

superiore a quella necessaria, pari a 122.19 Nm, per una velocità angolare nominale di

$$\Omega_{nom} = \frac{P_{ruota}}{T_{nom}} = 68.3\ rad/s. \quad (3.29)$$

I dati a disposizione permettono infine di calcolare quale massa avrà la singola motoruota. A partire dal diametro rotorico al traferro, si possono individuare le dimensioni dei componenti del brushless facendo uso di alcuni rapporti caratteristici tipici nell'ambito della costruzione di macchine elettriche brushless, ad alto numero di poli, con rotore esterno:

- $D_e/D = 1.08$: rapporto tra diametro esterno e diametro al traferro;
- $D/D_i = 1.29$: rapporto tra diametro al traferro e diametro interno;
- $l_i/l = 0.56$: rapporto tra la lunghezza interna (statore) e lunghezza esterna (rotore)³.

In base a questi coefficienti si possono ricavare i dati di Tabella 3.5. Per quanto riguarda gli avvolgimenti, si sono adottati dei valori di massima che si possono trovare per le applicazioni nelle motoruote di trazione. Le masse in gioco sono quindi:

- massa del rotore = 6.526kg
- massa dello statore = 6.99 kg
- massa degli avvolgimenti = 5.336 kg

In questo modo la massa complessiva di ciascun motore elettrico si attesta sui 18.854 kg. Il risultato ottenuto è piuttosto soddisfacente. Le possibili ottimizzazioni per le masse non sospese sono comunque da ricercarsi nei materiali con cui sono fatte le parti accessorie (quali il cerchio, i freni, i mozzi).

Tutti i componenti sono così dimensionati. Si può procedere alla somma complessiva delle massa delle componenti elettriche che vanno a sostituire quelle meccaniche per giungere al valore di massa conclusivo:

³ Per il motore in progetto statore e rotore sono invertiti, ma si formula l'ipotesi che il rapporto tra la parte interna e quella esterna possa essere lo stesso del caso più generale.

$$m_{4inwheel} = m_{auto} + m_{parti\ elettriche} - m_{parti\ meccaniche} = 1150.57\ kg \quad (3.30)$$

A scopo sinottico si riportano nelle Tabelle 3.6 e 3.7 tutte le masse che sono state tolte o aggiunte per arrivare al dato della (3.30)

Motore endotermico 1100 cc	90 Kg
Cambio	40 kg
Frizione	3.545 kg
Differenziale	4.5 kg
Totale	138.045 kg

Tabella 3.6: Tabella riassuntiva delle masse che vengono tolte nella configurazione innovativa

Inverter delle motoruote	20 kg
Inverter del generatore	15 kg
Convertitore DC/DC	7 kg
Caricabatterie	7 kg
Batterie	74.8
Motore motociclistico	32 kg
Generatore elettrico	17.4 kg
Motoruote	75.416 kg
Totale	248.6 kg

Tabella 3.7: tabella riassuntiva delle masse che vengono aggiunte nella configurazione innovativa

Il confronto della massa iniziale della vettura di serie (840 kg) con la massa della vettura ora ottenuta (950 kg), permette di riscontrare un aumento di 110 kg (13% in più).

Ad onor del vero questo dato va considerato con le dovute pregiudiziali poiché, se desiderato, si potrebbero cambiare il serbatoio ed il sistema di scarico dell'auto di serie, e in ogni caso non sono state considerate alcune masse difficili da quantificare con i dati in possesso, ad esempio i semiassi.

L'intero processo di dimensionamento è partito dall'ipotesi di assumere la massa pari a quella del veicolo di serie. Ora che è noto il peso effettivo, una volta inseriti i componenti che rendono ibrido l'automezzo, è necessario verificare che tutte le coppie e le potenze disponibili siano adeguate. Il processo è perciò iterativo.

In sintesi, per un veicolo di massa pari a 1150.57 kg, sono richieste alla ruota le seguenti grandezze:

Richieste	Unità di misura	Dati effettivi - massa	
		1150 kg (step 2)	1114 kg (step 1)
P_{nom}	[kW]	34.555	34.410
$P_{nom\ ruota}$	[kW]	8.639	8.602
$T_{spunto\ ruota}$	[Nm]	318.26	308.52
$T_{nom\ ruota}$	[Nm]	127.3	123.4

Tabella 3.8 Dati richiesti per una vettura di massa 1150.57 kg

Si può quindi ripetere il procedimento di calcolo condotto in precedenza. Si nota però la potenza richiesta al motogeneratore (corrispondente in questo caso a circa 43.2 kW) varia in misura molto contenuta rispetto allo step precedente, per cui il dimensionamento del motore endotermico e del generatore porta a mantenere le scelte effettuate. Si verifica ora che la motoruota sia in grado di soddisfare le richieste, in termini di coppia; è necessario quindi ripetere il dimensionamento dei quattro motori brushless. Si ricorre ancora una volta al metodo di ottimizzazione già impiegato per il calcolo del diametro rotorico ottimale. Il

nuovo diametro così ottenuto risulta $D=0.234$ m, ancora una volta compatibile con il cerchio di serie. Ne consegue che le coppie effettive risultano essere pari a:

$$T_{nom\ ruota\ eff} = 132.9\ Nm \quad (3.31)$$

$$T_{spunto\ ruota\ eff} = 332.25\ Nm \quad (3.32)$$

Le richieste di Tabella 3.8 sono così perfettamente soddisfatte. Imponendo il soddisfacimento della potenza nominale, si ricava una velocità angolare nominale pari a:

$$\Omega_{nom\ eff} = \frac{P_{nom\ ruota}}{T_{nom\ ruota\ eff}} = 65\ \frac{rad}{s} \quad (3.33)$$

Un nuovo valore del diametro D comporta il ricalcolo delle caratteristiche geometriche e delle masse del rotore e dello statore. Si perviene quindi ai seguenti risultati:

- massa del rotore = 6.814 kg
- massa dello statore = 7.3 kg
- massa degli avvolgimenti = 5.57 kg

Per un nuovo peso della singola motoruota di 19.68 kg. L'aumento di peso rispetto alla prima iterazione è inferiore ad 1 kg, per cui si ritiene soddisfacente il risultato ottenuto, in quanto l'aumento delle richieste in un'iterazione successiva sarà così modesta da essere già soddisfatta dalle coppie appena trovate.

La Tabella 3.9 riporta tutte le caratteristiche geometriche del motore

ROTORE	UNITÀ DI MISURA	VALORE
Lunghezza assiale	mm	117.25
Diametro esterno	mm	253.8
Diametro interno	mm	234.5
Induzione media nel ferro	T	0.9
Volume del rotore	dm ³	0.868
Densità	kg/dm ³	7.85
Massa del rotore	kg	6.81
STATORE		
Diametro esterno	mm	225
Diametro interno	mm	180.97
Lunghezza assiale	mm	66.53
Densità	kg/dm ³	7.7
Massa dello statore	kg	7.3
AVVOLGIMENTI		
Numero di fasi		3
Numero di bobine		96
Volume totale delle bobine	dm ³	0.625
Densità	kg/dm ³	8.9
Massa totale delle bobine	kg	5.57

Tabella 3.9 Quadro riassuntivo delle caratteristiche della motoruota

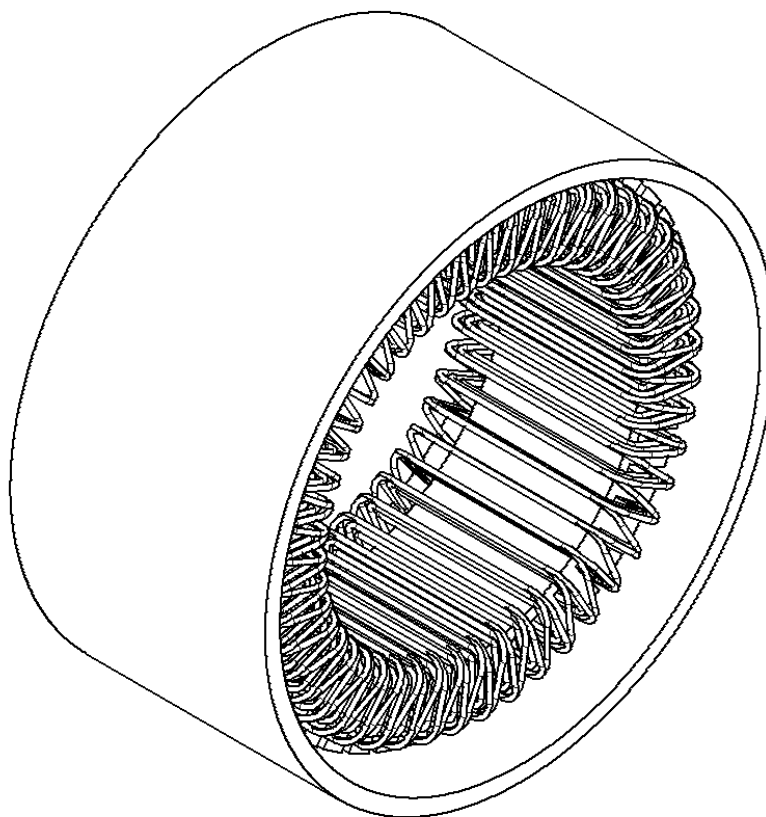


Figura 3.5 Rappresentazione assonometrica del motore elettrico brushless della motoruota

T_{nominale}	132.9Nm
T_{max}	332.25 Nm
J_{rotore}	0.1 kgm ²
J_{statore}	0.076 kgm ²
Ω_{nominale}	65 rad/s

Tabella 3.10. Dati caratteristici della singola motoruota indipendente

Capitolo IV

Descrizione del modello

In questo capitolo viene sviluppato un modello numerico di simulazione per il veicolo ibrido serie con configurazione innovativa (le quattro motoruote indipendenti) in esame. Si hanno diversi vantaggi nell'avere a disposizione un modello della vettura. In particolare se ne ricordano due: da un lato si può prevedere il comportamento del veicolo, in termini di consumi e delle grandezze elettro-meccaniche che esso esprime, senza dover avere fisicamente a disposizione la vettura. In secondo luogo, costruire un modello parametrico rende possibile variare uno o più parametri, mantenendo invariata la struttura e l'integrità del sistema. Lo schema a blocchi complessivo del modello, realizzato con Matlab Simulink®, è rappresentato in Figura 4.1. Si possono individuare i blocchi rappresentanti la propulsione primaria (motore CI), connesso al generatore di energia elettrica, le batterie, il gruppo delle quattro motoruote ed i relativi inverter, la parte inerente la gestione della frenatura, quella rappresentativa del veicolo, la gestione della logica e la definizione del flusso di carburante. Nei paragrafi seguenti vengono presentati i blocchi del modello, il cui obiettivo è quello di riprodurre il più fedelmente possibile il comportamento del veicolo, ed in particolar modo i flussi di potenza fra i componenti, per un dato ciclo di riferimento. Per la realizzazione del modello numerico della Fiat Panda ibrida serie con un sistema di quattro motoruote indipendenti, si è fatto riferimento inizialmente ad un modello già sviluppato presso il Politecnico di Milano, rappresentativo di un veicolo ibrido bimodale. Il

modello in questione ([29],[30]), riguarda la versione ibrida bimodale di una Fiat Grande Punto 1.2. Lo schema base può essere adottato anche per la presente trattazione cambiando solo alcuni parametri; su questi poi è necessario realizzare i blocchi caratteristici del veicolo serie, non presenti nella modellazione precedente, che devono essere implementati totalmente. L'ibrido bimodale è, dal punto di vista dei flussi energetici, corrispondente ad un ibrido parallelo; di fatto quindi, il modello per un veicolo ibrido serie deve prevedere la semplificazione del blocco relativo alla trasmissione. Si deve inoltre tener conto del fatto che, a differenza dell'ibrido parallelo, la velocità del motore endotermico non è legata a quella delle ruote; cambieranno quindi parte della modellazione del blocco motore a combustione interna e le logiche di controllo della vettura.

In conseguenza a quanto detto i blocchi relativi al pacco batterie, alla dinamica longitudinale del veicolo, al serbatoio rimangono gli stessi, a meno del cambiamento dei dati relativi alle due vetture. Il blocco del motore elettrico ed al relativo inverter viene ridefinito per le quattro motoruote, mentre il blocco generatore viene implementato in questo modello.

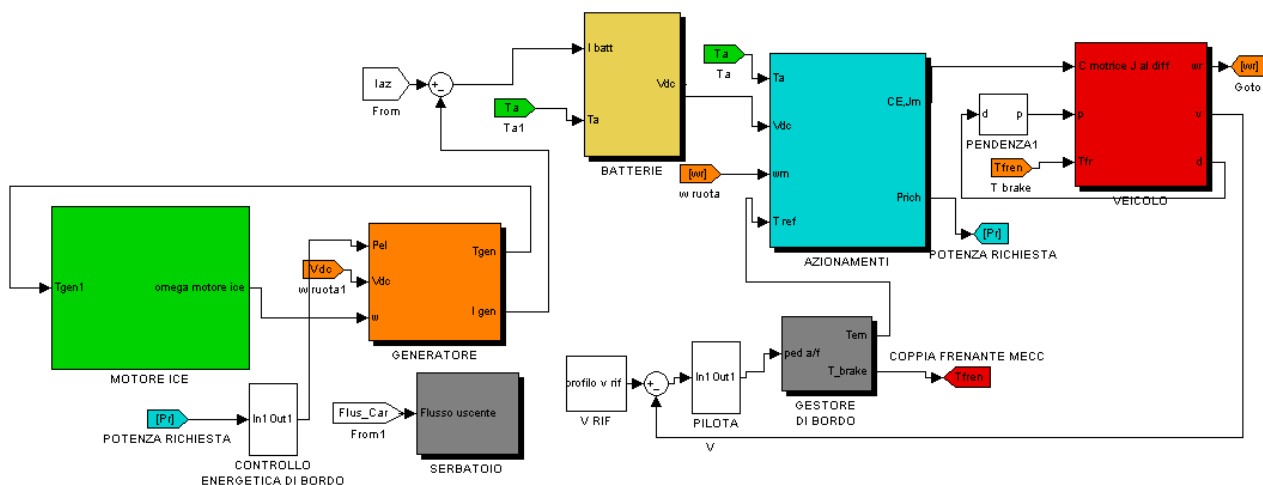


Figura 4.1 Rappresentazione d'insieme del modello Simulink®

In questa trattazione si considera che, dal punto di vista energetico, le quattro motoruote indipendenti si comportino allo stesso modo. In particolare, il macroblocco relativo agli azionamenti elettrici (i quattro motori brushless rappresentativi delle motoruote e gli

inverter che li comandano, cfr § 4.5) viene al suo interno sviluppato per una singola motoruota, mentre nel resto del modello tutti i blocchi sono stati sviluppati considerando l'intero veicolo, ossia l'insieme delle quattro motoruote. In ingresso ed all'uscita del macroblocco degli azionamenti, le grandezze vengono quindi rispettivamente divise e moltiplicate per il numero di motoruote presenti.

4.1 Pilota

Il blocco "pilota" (rappresentato in Figura 4.2) è costituito da un controllo in feedback sulla velocità del veicolo, di tipo PI; riceve in input il ciclo di riferimento ed in retroazione la velocità effettiva, e fornisce come output il segnale del pedale freno-acceleratore.

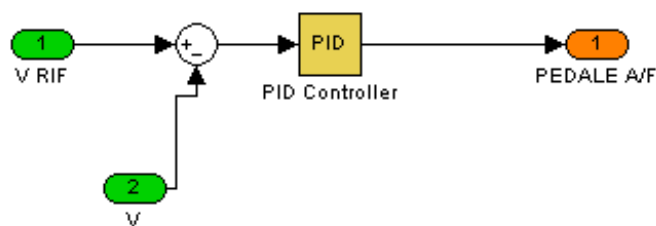


Figura 4.2 Modello del pilota

4.2 Gestore di bordo

Nel modello della Punto bimodale, il gestore di bordo indirizza il segnale proveniente dal pedale dell'acceleratore ad uno dei due motori, a seconda della modalità di funzionamento; in questo caso, il gestore di bordo invia il segnale al solo motore deputato alla trazione, ossia l'insieme delle quattro motoruote indipendenti.

In ingresso al blocco del gestore di bordo c'è il segnale che rappresenta il pedale freno-acceleratore della vettura (Figura 4.3). Il nucleo di questo blocco è rappresentato da una *S-Function* che definisce, in funzione dello stato di carica delle batterie, la possibilità o meno di frenare in elettrico, e quindi di ricaricare le batterie. In base al valore istantaneo di SOC, il gestore decide se attivare il freno meccanico, e quindi dissipare l'energia proveniente dalla frenatura, evitando di danneggiare le batterie; in caso contrario, si sfrutta la reversibilità dell'azionamento elettrico per recuperare energia. Questo blocco fornisce quindi come output la coppia frenante meccanica e quella di riferimento per l'intero gruppo delle motoruote.

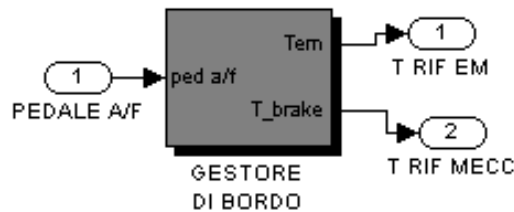


Figura 4.3 Modello del gestore di bordo

All'interno della *S-Function* sono state anche introdotte le caratteristiche di coppia massima e minima delle motoruote, per ricondurre i valori di coppia richiesta nei limiti reali delle motoruote. In Figura 4.4 si riportano quindi i grafici delle caratteristiche massima e minima delle motoruote, in funzione della velocità angolare, considerando che questo blocco è stato sviluppato per l'intera macchina.

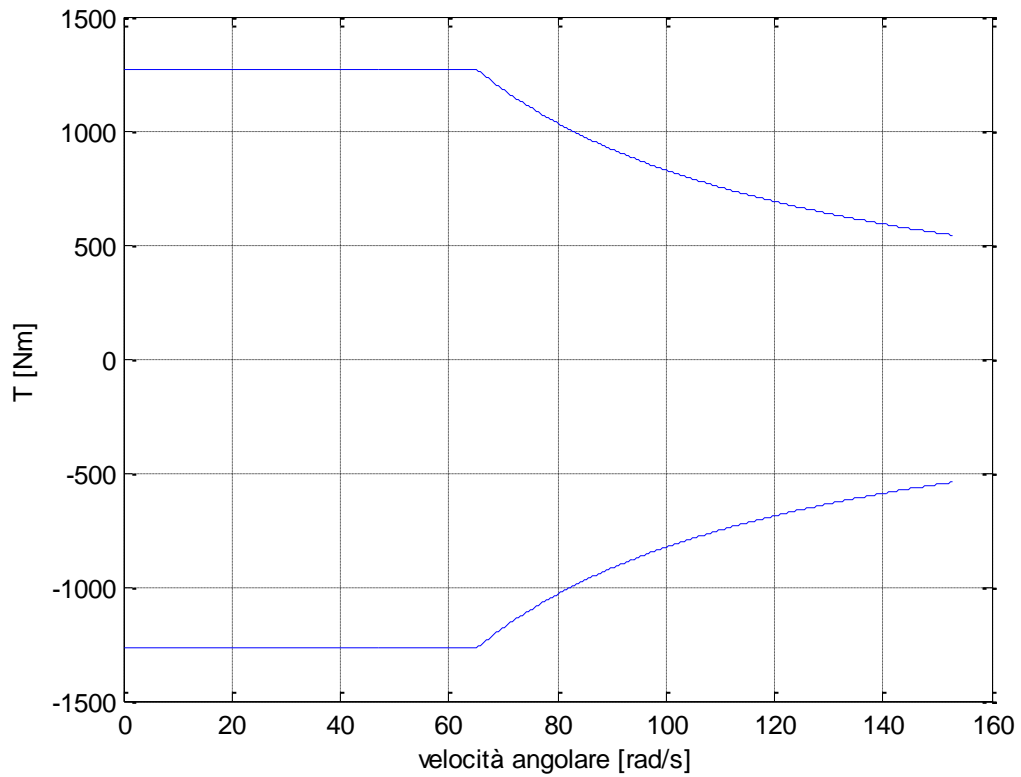


Figura 4.4 Andamento della coppia minima e massima dell'insieme delle quattro motoruote, in funzione della velocità di rotazione

4.3 Motore a combustione interna

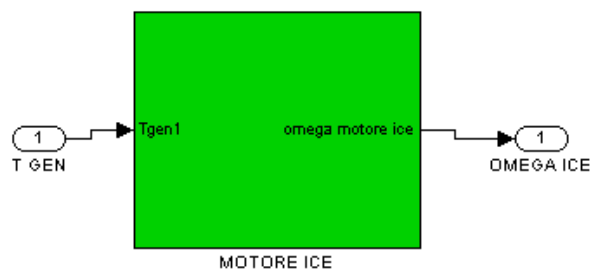


Figura 4.5 Modello del motore endotermico

Dalla Figura 4.5 si osserva come l'input di questo blocco sia la coppia del generatore, necessaria per esprimere l'equazione della dinamica meccanica (4.1), e l'output sia la velocità angolare del motore endotermico, che corrisponde a quella del generatore.

Per questo blocco, gli elementi principali da modellare sono due: l'anello di controllo sulla velocità angolare e le mappature necessarie per determinare le principali caratteristiche del motore stesso.

A differenza dell'ibrido parallelo, in un ibrido serie la velocità angolare del motore CI non è legata a quella delle ruote, tramite una trasmissione; si impone quindi al motore CI un regime di rotazione ottimale. Per fare questo, si chiude un anello di controllo sulla velocità del motore. La dinamica del sistema è rappresentata dall'equazione

$$J_{ice_gen} \cdot \frac{d\Omega}{dt} + r \cdot \Omega = T_{ice} - T_{gen} \quad (4.1)$$

dove il riferimento di velocità è $\Omega_{rif} = 8000$ rpm (che corrisponde a circa 838 rad/s), J_{ice_gen} è il momento d'inerzia del gruppo moto-generatore ed r è il termine rappresentativo della dissipazione interna al motore. In questo anello, la coppia di controllo è rappresentata dal pedale dell'acceleratore del motore endotermico.

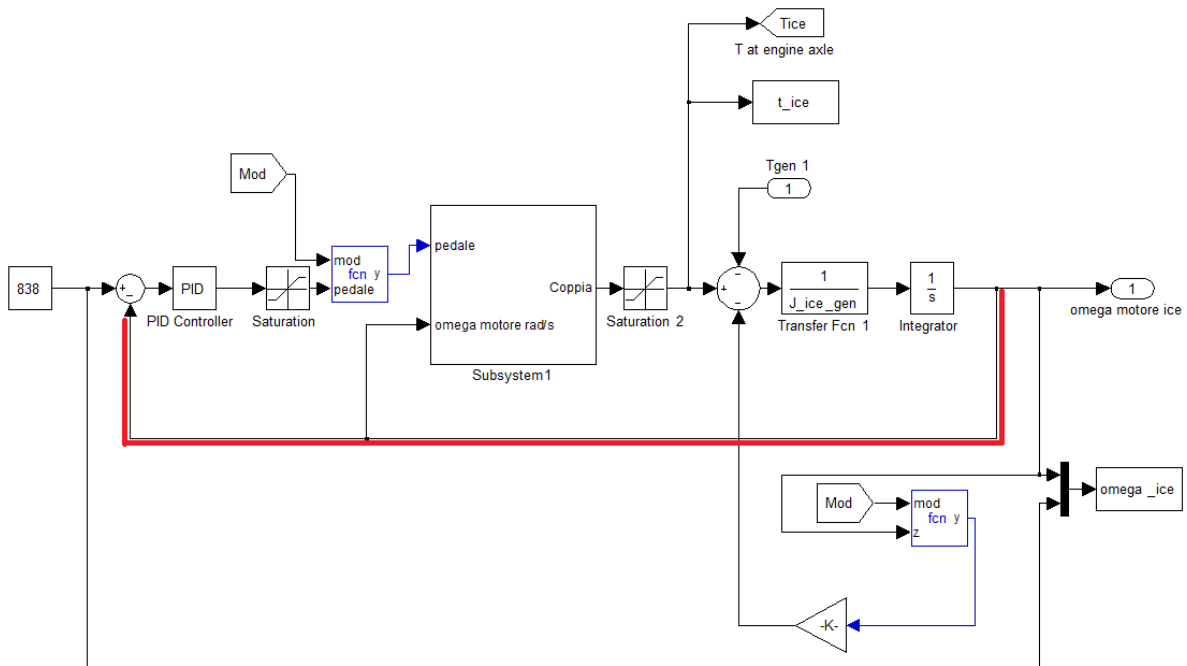


Figura 4.6: Anello di controllo della velocità del motore CI (in rosso)

A questo punto, tramite una serie di *Look Up Tables*, vengono ricavati i valori dell'ammissione, della coppia e dei consumi del motore endotermico. In particolare, sono state riproporzionate le mappe relative al motore motociclistico considerato, con riferimento alla letteratura specifica sui motori a combustione interna [24]. La prima mappa rappresenta la legge che regola l'apertura della farfalla, in base al regime di rotazione ed al comando dell'acceleratore. Una seconda mappatura viene usata per riprodurre la coppia del propulsore in funzione dell'apertura della farfalla e del regime di rotazione. Infine è presente una terza mappa che permette di valutare il consumo di combustibile in base al regime di rotazione ed alla coppia erogata. Il sottoblocco delle *Look Up Tables* riceve in input la coppia di controllo proveniente dal pedale, mentre fornisce in output la coppia effettiva del motore ed il consumo di carburante.

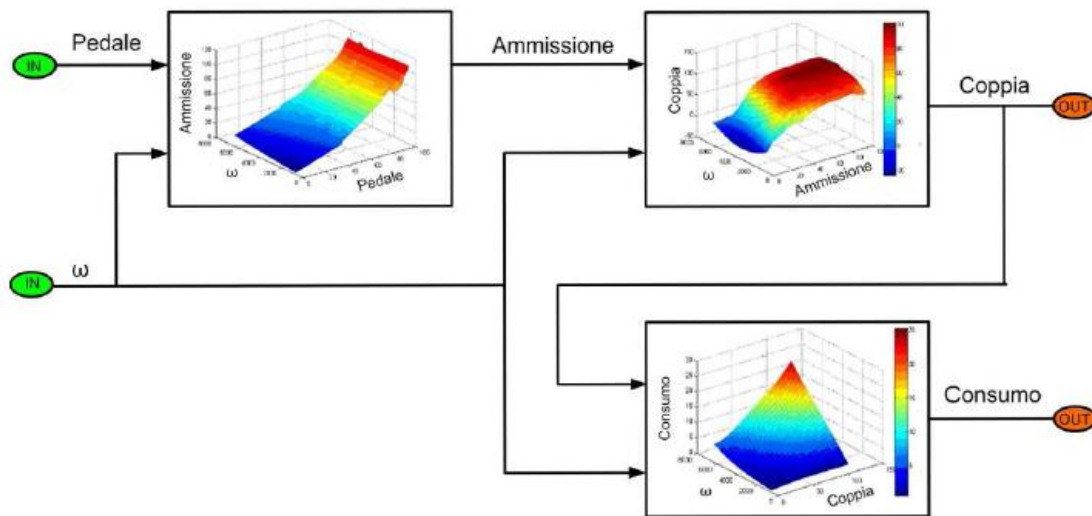


Figura 4.7: Rappresentazione schematica del motore endotermico

Come riportato in precedenza, la rimappatura del motore dell'Aprilia RXV 550 viene effettuato con riferimento ai testi presenti in letteratura [24]. Queste rimappature sono chiaramente approssimazioni del comportamento reale del motore motociclistico, comunque ragionevoli, e se ne potrebbe verificare la validità in seguito ad una campagna di prove sperimentali sul motore motociclistico.

Da notare che il flusso di carburante non subisce più nessuna trasformazione all'interno del macroblocco del motore CI, e viene direttamente trasferito al blocco del serbatoio. Quest'ultimo è rappresentato in maniera molto semplice da una costante pari alla capienza; il livello di carburante viene man mano diminuito in base alla richiesta.

4.4 Generatore elettrico

Il blocco relativo al generatore è peculiare del nuovo modello di questa trattazione. Il generatore elettrico è un organo posto a valle del motore a combustione interna, ed è direttamente connesso ad esso, dovendo girare alla stessa velocità angolare.

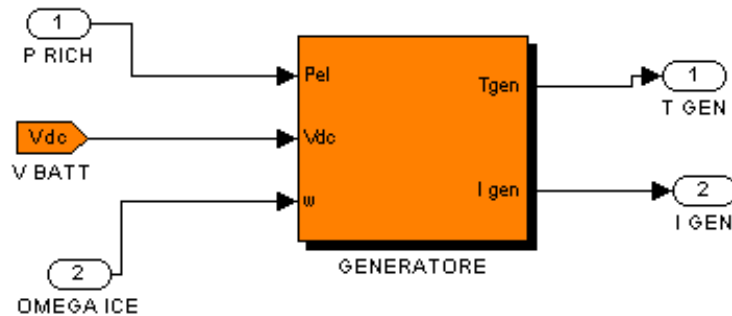


Figura 4.8 Modello del generatore

Il suo ruolo è quello di convertire l'energia meccanica fornita dal motore primario in energia elettrica da rendere disponibile alle motoruote. Il generatore stesso si presenta fisicamente come un motore brushless, perciò la sua dinamica segue le equazioni (4.2)-(4.3).

$$V_q = k_e \cdot \Omega + R_s \cdot I_q + L_s \cdot \Omega \cdot n \cdot I_q \quad (4.2)$$

$$V_d = R_s \cdot I_d - L_s \cdot \Omega \cdot n \cdot I_q \quad (4.3)$$

con

$$|\bar{V}_s| = \sqrt{V_d^2 + V_q^2}; |\bar{I}_s| = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (4.4)$$

Da notare che, funzionando da generatore, questo motore brushless ha una corrente I_q negativa.

In particolare, il generatore è un motore brushless pilotato da un inverter; le perdite di questo inverter, a differenza del caso delle motoruote, dove per altro sono molto più importanti, vengono modellate come una costante moltiplicativa da applicare alla potenza richiesta.

Ogni macchina è contraddistinta da una potenza generata, alla quale devono essere aggiunte le perdite, fisicamente inevitabili, per arrivare alla potenza totale richiesta. Le perdite di un motore elettrico sono, in termini del tutto generali, riconducibili all'effetto Joule, e passano comunemente con la denominazione di perdite del rame, e le perdite nel ferro, legate al rapporto tra la velocità angolare istantanea del motore e la sua velocità nominale. Nel modello realizzato si sono considerate principalmente queste due variabili. Il blocco generatore riceve sempre in ingresso la potenza totale richiesta dai quattro azionamenti. Se la potenza relativa all'avanzamento deve essere garantita dal sistema di accumulo, la potenza richiesta al generatore, e conseguentemente le relative grandezze elettromeccaniche, vengono poste nulle. Se invece la logica di controllo decide che il generatore debba fornire una certa potenza, si tiene conto delle perdite nel ferro del generatore e delle perdite di potenza dell'inverter attraverso un coefficiente riduttivo di 0.95. Si calcolano ora i parametri caratteristici del generatore, la costante di coppia K e la resistenza R ; per la prima si introducono nel blocco del generatore la velocità angolare del motore endotermico Ω_{ICE} (che corrisponde alla velocità alla quale ruota anche il generatore) e la tensione in ingresso all'inverter $V=140$ V:

$$K = \frac{V}{\Omega_{ICE}} \quad (4.5)$$

Per quanto riguarda la resistenza, si ottiene a partire dalla potenza nominale del generatore, pari a 53.05 kW (cfr. Tabella 3.4 § 3.3.3), da un valore ragionevole di $\cos\varphi$, pari a 0.97, dal rendimento del generatore, pari a 0.96, e calcolando la corrente nominale del generatore:

$$I_{nom} = \frac{P_{nom}}{\cos\varphi \cdot \eta_{gen} \cdot \sqrt{3} \cdot V} \quad (4.6)$$

$$R = \frac{Pot_{nom} \cdot (1 - \eta_{gen})}{3 \cdot I_{nom}^2} \quad (4.7)$$

Si ricava quindi la coppia richiesta al generatore, a partire dalla potenza richiesta dalla logica di controllo

$$T_{gen} = \frac{P_{rich}}{\Omega_{ICE}} \quad (4.8)$$

A questo punto si calcola la corrente del generatore, si ricavano le perdite nel rame, e si determina la potenza totale richiesta al blocco generatore:

$$I_{gen} = \frac{T_{gen}}{K} \quad (4.9)$$

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{gen}^2 \cdot R \quad (4.10)$$

$$P_{rich\ tot} = P_{cu} + P_{rich} \quad (4.11)$$

Da qui si ricava la coppia totale richiesta al generatore:

$$T_{gen\ tot} = \frac{P_{rich\ tot}}{\Omega_{ICE}} \quad (4.12)$$

Poiché il generatore è un azionamento controllato, si introduce un saturatore per evidenziarne i limiti, mentre per modellare l'effetto reale del ritardo si introduce un blocco *Transfer Function* del primo ordine, applicato sulla coppia, che ha una costante di tempo pari a $0.05\ s^{-1}$. Esso garantirà una dinamica più veloce rispetto alla dinamica presente sulla coppia del motore endotermico, dove sono state introdotte *Transfer Function* con costanti di tempo maggiori. A partire quindi dalla coppia effettiva che esprime il generatore (che verrà inviata al blocco del motore endotermico), si ricava la potenza effettiva espressa dal generatore, e conseguentemente la sua corrente effettiva, che sarà poi inviata al nodo di conguaglio per il bilancio delle correnti (si veda il paragrafo 4.8), dividendo la potenza effettiva per la tensione di batteria.

$$P_{eff\ gen} = T_{eff\ gen} \cdot \Omega_{ICE} \quad (4.13)$$

$$I_{eff\ gen} = \frac{P_{eff\ gen}}{V_{batt}} \quad (4.14)$$

4.5 Batterie

Il blocco relativo alle batterie rimane sostanzialmente lo stesso; se ne fornisce una breve descrizione. La corrente effettiva garantita dal generatore viene inviata al nodo di conguaglio, nel quale viene eseguito un bilancio di correnti; la differenza tra la corrente totale richiesta dai quattro azionamenti e quella espressa dal generatore rappresenta la corrente entrante nella batteria. In ingresso al blocco della batteria ci sono la corrente e la temperatura ambiente. Si calcola lo stato di carica del pacco batterie tramite la seguente formula, introducendo lo stato di carica iniziale SOC_{in} e la capacità C del pacco batterie, relativa ai 68 elementi in serie:

$$SOC = SOC_{in} - \frac{\int_{t_0}^t I_{batt}(\tau) d\tau}{C} \quad (4.15)$$

Per le batterie, vale la seguente legge delle tensioni, rappresentata in Figura 4.9.

$$V_{batt} = V_0 - R \cdot I_{batt} \quad (4.16)$$

dove V_0 è la tensione disponibile a circuito aperto ed R è la resistenza del pacco batterie, che si ricava, tramite un'opportuna *look up table*, a partire dal valore istantaneo del SOC. Per quanto riguarda il calcolo di V_0 , viene determinato anch'esso tramite una *look up table*, che ha in ingresso anche in questo caso il valore istantaneo di SOC. Si calcola poi la potenza dissipata nelle batterie tramite la seguente formula:

$$P_{diss} = R \cdot I_{batt}^2 \quad (4.17)$$

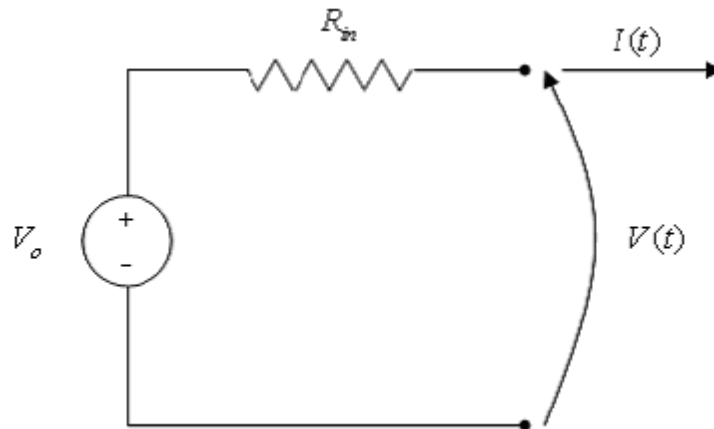


Figura 4.9 Circuito equivalente di batteria

La tensione e la potenza dissipata effettive si trovano moltiplicando le grandezze determinate in (4.16) e (4.17) per il numero di elementi posti in serie, che in questo caso sono 68. Per quanto riguarda l'aspetto termico, la sovratemperatura θ rispetto alla temperatura ambiente si ricava dalla seguente espressione:

$$P_{tot} = C_{th} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{R_{th}} \quad (4.18)$$

dove C_{th} e R_{th} sono rispettivamente la capacità e la resistenza termica del pacco batterie. In questo caso si considera il valore assoluto della potenza dissipata, in quanto anche la corrente negativa (quindi di carica per le batterie) contribuisce a dissipare potenza. Si determina infine la temperatura del pacco batterie, a partire dalla temperatura ambiente:

$$T_{batt} = T_{amb} + \theta \quad (4.19)$$

4.6 Azionamenti brushless

Lo schema generale di questo blocco è analogo a quello del modello di riferimento, ma è necessario ripensare le equazioni dinamiche, poiché sono riferite ad azionamenti diversi da quello del modello di partenza. In particolare, in questo caso diventa fondamentale la modellazione della fase di deflussaggio del motore, perché il regime di rotazione è lo stesso delle ruote del veicolo. Gli input per questo blocco sono rappresentati:

- dalla coppia di riferimento per l'intera veicolo; essa viene riportata alla singola ruota, dividendola per quattro e con questo valore si effettuano i calcoli necessari per determinare le grandezze elettro-meccaniche di interesse del singolo motore. Gli output del macro-blocco azionamento vengono poi riferiti all'intera vettura;
- dalla velocità angolare della singola motoruota che corrisponde direttamente a quella della ruota stessa;
- dallo stato di carica delle batterie (SOC);
- dalla potenza fornita dal generatore.

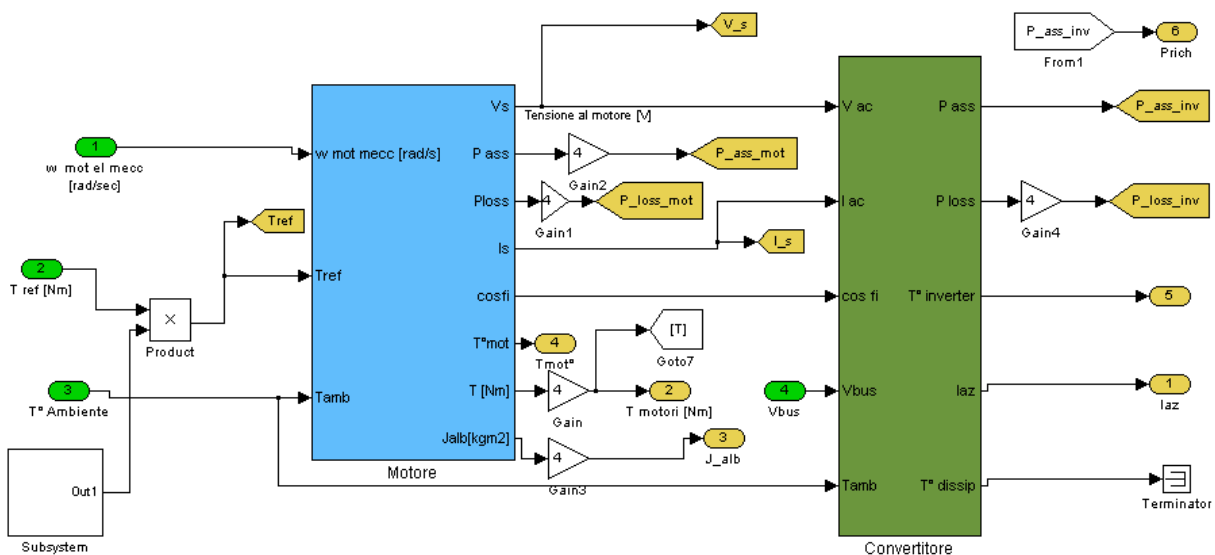


Figura 4.10 Modello degli azionamenti

Il codice MatLab che governa il modello agisce come mostra la Figura 4.11

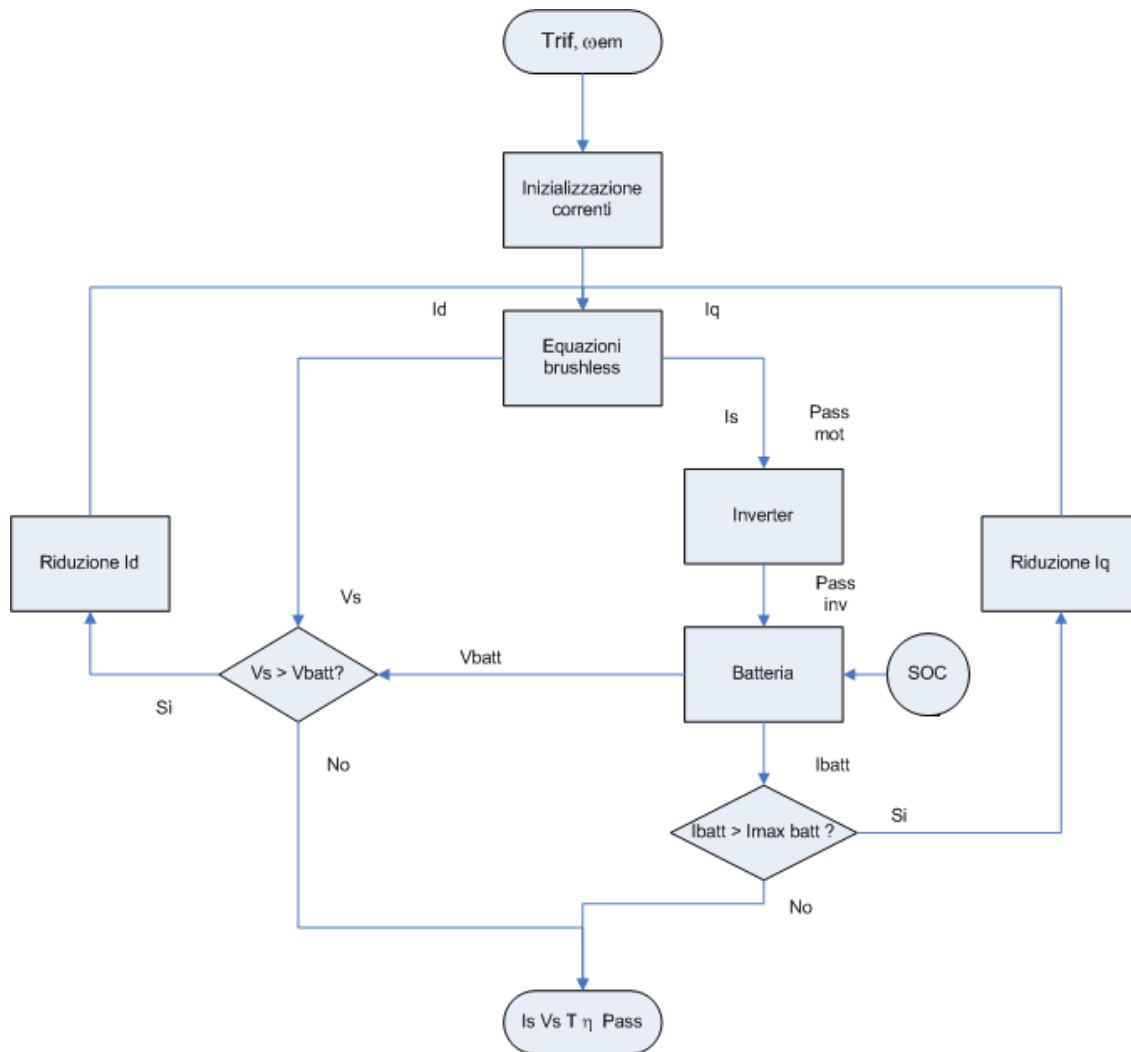


Figura 4.11 Logica del modello brushless

Si riportano di seguito le principali equazioni rappresentate in ogni blocco.

1. Inizializzazione delle correnti: dopo aver impostato la corrente I_d dalla (4.20) e calcolate le perdite nel ferro come definito dalla (4.21), nota la coppia di riferimento si può calcolare la corrente I_q tramite la (4.22)

$$I_d = 0 \quad (4.20)$$

$$P_{fe} = P_{fen} \cdot \left(\frac{\Psi_m + I_d \cdot L_s}{\Psi_m} \right)^2 \cdot \frac{\Omega}{\Omega_n} \quad (4.21)$$

$$I_q = \frac{Trif + \frac{P_{fe}}{\Omega}}{k_e} \quad (4.22)$$

2. Equazioni del brushless: note le correnti, si risolve il diagramma fasoriale di figura (4.12), che, proiettato sugli assi, dà origine alle equazioni (4.23) e (4.24)

$$V_q = k_e \cdot \Omega + R_s \cdot I_q + L_s \cdot \Omega \cdot n \cdot I_q \quad (4.23)$$

$$V_d = R_s \cdot I_d - L_s \cdot \Omega \cdot n \cdot I_q \quad (4.24)$$

Si calcolano poi la potenza assorbita da ogni motoruota, come in (4.25), ed i fasori di tensione e corrente, come in (4.26)

$$P_{ass\ mot} = V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q \quad (4.25)$$

$$|\bar{V}_s| = \sqrt{V_d^2 + V_q^2}; |\bar{I}_s| = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (4.26)$$

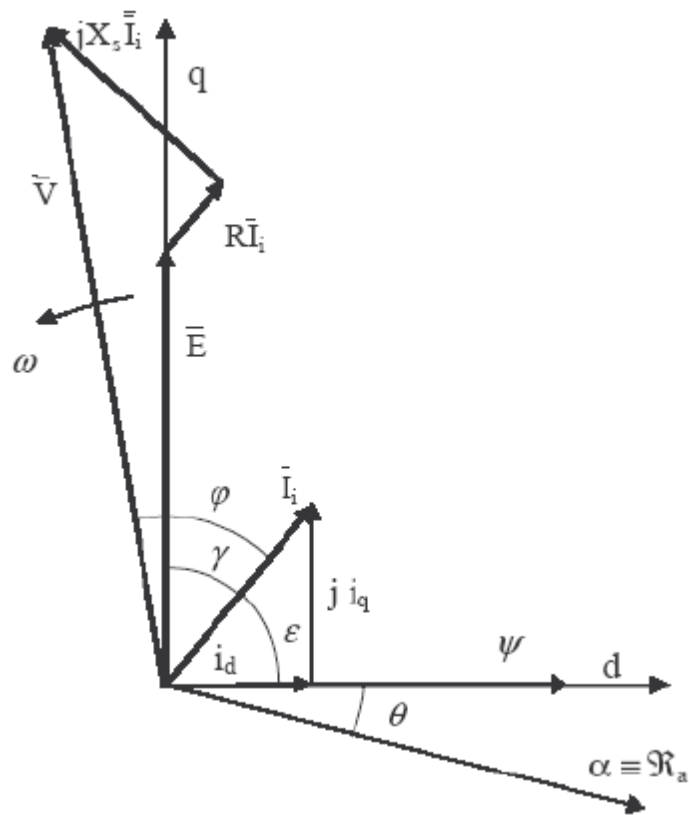


Figura 4.12 Diagramma fasoriale del motore sincrono

3. Inverter: nota la corrente efficace assorbita dal motore, tramite la (4.27) si ricava la corrente massima, che, inserita nelle (4.33)-(4.36), permette di ricavare le perdite

Come mostra la (4.29), la potenza assorbita dall'inverter è pari alla somma della potenza assorbita dal motore, definita nella (4.25), e delle perdite totali, espresse nella (4.28) e definite per esteso nelle (4.34)-(4.37).

$$I_{max} = I_s \cdot \sqrt{2} \quad (4.27)$$

$$P_{loss\ inv} = (P_{fwT} + P_{fwD} + P_{comT} + P_{comD}) \cdot 6 \quad (4.28)$$

$$P_{ass\ inv} = P_{ass\ mot} + P_{loss\ inv} \quad (4.29)$$

4. Batteria: nota la potenza richiesta dall'inverter, si risolve il circuito equivalente di figura (4.9) rappresentato dall'equazione delle potenze in gioco nella (4.30), distinguendo il caso di propulsione primaria accesa o spenta. I valori di tensione e resistenza interna, che sono funzioni del SOC, sono mappati sperimentalmente.

$$P_{batt} = V_0(SOC) \cdot I_{batt} - R_{in}(SOC) \cdot I_{batt}^2 \quad (4.30)$$

5. Riduzione di I_q : se la corrente assorbita dalla batteria è superiore a quella massima erogabile, per evitare il danneggiamento della batteria stessa, si riduce iterativamente la corrente I_q , come definito dalla (4.31)

$$I_{q\ i+1} = I_q \cdot \tau \quad (4.31)$$

dove τ è un valore minore di uno, scelto in base alla precisione ed ai tempi di calcolo desiderati. Da notare che, per quanto riguarda la corrente di carica, si ammette un limite leggermente superiore a quello riportato in Tabella 4.2.

6. Riduzione della I_d : per limitare la tensione a valori inferiori a quello massimo erogato dalla batteria, si introduce una corrente negativa I_d , tale che il fasore V_s risulti uguale alla massima tensione disponibile.

7. Riduzione della I_q : per limitare la corrente a valori inferiore a quello massimo erogabile, si verifica se è necessario ridurre la componente I_q , in modo tale che rispetti il vincolo riportato in (4.32); questo punto non è rappresentato nel diagramma perché, in seguito ad una riduzione della corrente I_d , si devono comunque ricalcolare le equazioni relative al motore brushless.

$$I_q = \sqrt{I_{max}^2 - I_d^2} \quad (4.32)$$

In output vengono forniti i valori dell'ultima iterazione e la coppia viene ricalcolata secondo la (4.33), in base al valore di corrente I_q ottenuto.

$$T = K_e \cdot I_q - \frac{P_{fe}}{\Omega} \quad (4.33)$$

Da notare che, prima che entri nel blocco degli azionamenti, la coppia richiesta (o di riferimento) viene limitata dal gestore di bordo; questo evita che si richiedano condizioni di lavoro negative o irraggiungibili per la vettura.

La seconda parte del macroblocco relativo agli azionamenti è costituito dagli inverter. Come si può vedere in figura 4.13, un inverter è costituito da IGBT e diodi.

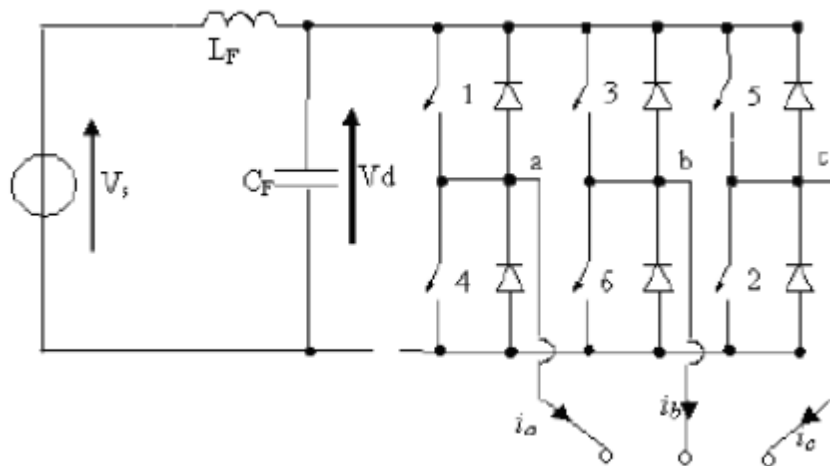


Figura 4.13 Schema elettrico di un inverter

Nel sottomodello rappresentante il convertitore, viene calcolata la potenza persa per conduzione nei transistor (4.34) e nei diodi (4.35), oltre a quella per commutazione, per i transistor (4.36) e per i diodi (4.37). Il sottomodello riceve in ingresso la tensione e la corrente assorbite dalla singola motoruota, e fornisce in output la corrente e la potenza necessarie per muovere l'intero veicolo, oltre alle perdite.

$$P_{f_{WT}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{A_{f_{WT}}}{\pi} \cdot I_{max} + \frac{B_{f_{WT}}}{4} \cdot I_{max}^2 \right) + m \cdot \cos\varphi \cdot \left(\frac{A_{f_{WT}}}{8} \cdot I_{max} + \frac{B_{f_{WT}}}{3 \cdot \pi} \cdot I_{max}^2 \right) \quad (4.34)$$

$$P_{f_{wD}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{A_{f_{wD}}}{\pi} \cdot I_{max} + \frac{B_{f_{wD}}}{4} \cdot I_{max}^2 \right) - m \cdot \cos\varphi \cdot \left(\frac{A_{f_{wD}}}{8} \cdot I_{max} + \frac{B_{f_{wD}}}{3 \cdot \pi} \cdot I_{max}^2 \right) \quad (4.35)$$

$$P_{comT} = f_s \cdot I_{max} \cdot \left(\frac{B_{onT}}{\pi} + \frac{C_{onT}}{4} \cdot I_{max} \right) + f_s \cdot I_{max} \cdot \left(\frac{B_{offT}}{\pi} + \frac{C_{offT}}{4} \cdot I_{max} \right) \quad (4.36)$$

$$P_{comD} = f_s \cdot I_{max} \cdot \left(\frac{B_{recD}}{\pi} + \frac{C_{recD}}{4} \cdot I_{max} \right) \quad (4.37)$$

dove $A_{f_{wT}}$, $B_{f_{wT}}$, $A_{f_{wD}}$, $B_{f_{wD}}$ sono i coefficienti di perdite per conduzione nelle rispettive valvole a semiconduttore, B_{onT} , C_{onT} , B_{offT} , C_{offT} sono i coefficienti di perdita, rispettivamente, in fase di accensione e spegnimento dei transistor, mentre B_{recD} e C_{recD} sono i coefficienti di perdita per spegnimento dei diodi. f_s è la frequenza di commutazione delle valvole, ed è pari a 7500 Hz, m è l'indice di modulazione e $\cos\varphi$ è il coseno della fase relativa tra la tensione e la corrente del motore. Le equazioni sopra riportate si riferiscono al singolo diodo ed al singolo IGBT, per cui la potenza persa nel singolo inverter dovrà essere moltiplicata per 6.

$$P_{loss\ inv} = (P_{f_{wT}} + P_{f_{wD}} + P_{comT} + P_{comD}) \cdot 6 \quad (4.38)$$

La potenza richiesta per muovere l'intero veicolo secondo il ciclo di riferimento imposto e vincere le perdite nelle quattro motoruote e nei relativi inverter, è quindi pari a:

$$P_{ass\ inv} = (P_{ass\ mot} + P_{loss\ inv}) \cdot 4 \quad (4.39)$$

Dalla (4.40) si ricava la corrente totale richiesta, che è pari a:

$$I_r = \frac{P_{ass\ inv}}{V_{batt}} \quad (4.40).$$

I principali output di questo macroblocco sono la potenza totale richiesta, $P_{ass\ inv}$, che viene inviata al blocco relativo alla logica di controllo, la corrente totale richiesta, I_r , che viene inviata al nodo di conguaglio e la coppia espressa dall'insieme delle quattro motoruote, che viene inviata al blocco del veicolo.

4.7 Veicolo

Il blocco relativo al veicolo è stato ripreso dal modello precedente; se ne fornisce di seguito una breve descrizione. Vengono modellate le forze equivalenti di trazione e quelle resistenti. La forza equivalente di trazione è data semplicemente dalla divisione per il raggio della ruota della coppia totale espressa dalle quattro motoruote. Per quanto riguarda le forze resistenti, analizzando la dinamica longitudinale del veicolo, si considerano la forza aerodinamica, la forza legata alla pendenza del percorso, la forza di attrito volvente e quella legata alla potenza dissipata nel caso di frenatura meccanica. Le espressioni sono riportate nelle formule (4.41)-(4.44):

$$\text{forza aerodinamica: } F_{aer} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S \cdot v^2 \quad (4.41)$$

$$\text{forza gravitazionale: } F_{grav} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (4.42)$$

$$\text{forza d'attrito volvente: } F_{attr} = m \cdot g \cdot (f_0 + f_2 \cdot v) \quad (4.43)$$

forza equivalente connessa alla coppia frenante meccanica:

$$F_{fren} = \frac{T_{fren}}{r} \quad (4.44)$$

Il blocco del veicolo si occupa di calcolare quali siano i risultati delle equazioni (4.41)–(4.44) ad ogni passo dell'integrazione. Si valuta la differenza F tra la forza equivalente di trazione (positiva) e la somma delle forze resistenti (negativa); si confronta poi quest'ultimo valore con l'espressione della forza limite di aderenza, riportata in (4.45)

$$\text{forza limite di aderenza: } F_{ade} = m \cdot g \cdot r \cdot c_{aderenza} \quad (4.45)$$

Per evitare lo slittamento, si considera, in ogni istante, la forza F minore tra le due (in questo modello la trattazione dello slittamento è del tutto semplificata), e da questa si ottiene l'accelerazione equivalente del veicolo, secondo la (4.46)

$$a = \frac{F}{m_{eq}} \quad (4.46)$$

dove la massa equivalente è data da:

$$m_{eq} = m_{tot\ veicolo} + \frac{J_{rotori\ motoruote}}{r^2} \quad (4.47)$$

A partire dal valore dell'accelerazione, si ricava poi il valore della velocità lineare per integrazione numerica, da confrontare con il riferimento, e della velocità angolare

$$\Omega = \frac{v}{r} \quad (4.48)$$

4.8 Gestione dell'energetica di bordo

Per un veicolo ibrido, il miglioramento del livello di conversione energetica e la diminuzione delle emissioni in atmosfera, dipendono fortemente dal tipo di strategia di controllo che si decide di implementare a bordo della vettura. La strategia di controllo deve, in ogni momento, determinare la potenza fornita dalla propulsione primaria (P_g) e dal pacco batterie (P_b), in modo da soddisfare la richiesta di potenza necessaria all'avanzamento (P_r), oltre ad altri vincoli, come il raggiungimento di un determinato livello di emissioni. In ogni istante vale il bilancio di potenze:

$$P_r = P_g + P_b \quad (4.49)$$

Lo schema di riferimento dei flussi di potenza di una vettura ibrida serie è riportato in Figura 4.14

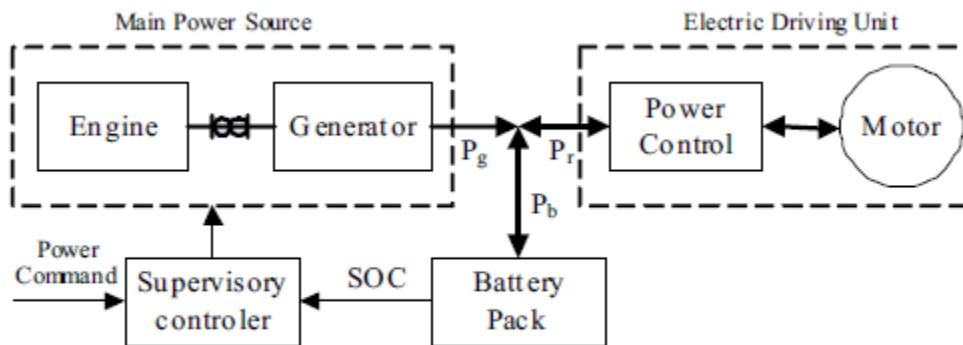


Figura 4.14: architettura di una vettura ibrida serie

Da notare che, dal punto di vista dell'analisi dei flussi di potenza, non ci sono differenze tra una vettura ibrida serie con un'architettura tradizionale ed una con una configurazione innovativa. Per questo, considerando il caso di veicolo ibrido serie con configurazione innovativa, si implementano le logiche tipiche del veicolo ibrido serie con configurazione tradizionale. La modellazione del gruppo motore endotermico-generatore è stata effettuata basandosi su mappature delle principali grandezze (si veda il paragrafo 4.3), mentre il modello delle batterie fornisce il valore istantaneo dello stato di carica del pacco batterie (si veda il paragrafo 4.5).

Gli elementi fondamentali per ogni strategia di controllo che si voglia implementare sono due: il nodo di conguaglio e la logica di controllo. Nel nodo di conguaglio si effettua il bilancio delle correnti presenti nel sistema: esso rappresenta il punto in cui si definisce la corrente di batteria. In particolare, le batterie rimangono sempre accese, e per questo vale sempre il bilancio riportato nella (4.50):

$$I_{batt} = I_{az} - I_{gen} \quad (4.50)$$

dove I_{az} rappresenta la corrente totale richiesta dagli azionamenti per garantire l'avanzamento della vettura, secondo il ciclo di riferimento richiesto, I_{gen} è la corrente che viene garantita dalla propulsione primaria, e I_{batt} è la corrente di batteria. Da notare che la

logica di controllo agisce sulle potenze, ed il nodo di conguaglio effettua il bilancio totale delle correnti. Tutte le logiche di controllo che possono essere implementate agiscono sulla propulsione primaria, in quanto essa è controllabile (come ovviamente lo sono le motoruote), a differenza invece del pacco batterie. In generale, in funzione di determinate caratteristiche, variabili da logica a logica (come ad esempio il valore istantaneo della potenza richiesta per l'avanzamento, o lo stato di carica istantaneo del pacco batterie), si decide di utilizzare o meno la propulsione primaria, ed eventualmente a che livello di potenza. A questo punto, come riportato dalle (4.11)-(4.14), si calcola la corrente fornita dalla propulsione primaria, e di conseguenza, a partire dal valore di I_{az} , la corrente di batteria si ricava dalla (4.50). In particolare, se non viene attivata la propulsione primaria, tutta la corrente necessaria agli azionamenti viene fornita dalle batterie. Se la propulsione primaria garantisce una potenza maggiore di quella richiesta per garantire l'avanzamento, le batterie vedono una corrente negativa, che le ricarica. Se la propulsione primaria garantisce esattamente l'avanzamento, le batterie mantengono uno stato di carica costante, mentre, se la potenza fornita dal gruppo motore endotermico-generatore è inferiore alla potenza richiesta, le batterie completano il soddisfacimento della domanda. Da notare che, anche se la trazione fosse garantita dalla propulsione primaria, quando il freno elettrico non sia disabilitato, tutte le frenate portano al recupero di energia, e quindi ad una ricarica delle batterie.

Le logiche di controllo che possono essere implementate in un veicolo ibrido serie sono molteplici. Le scelte più comuni sono le seguenti: si può decidere di mantenere ad un livello ottimale il punto di lavoro del motore endotermico (Thermostat Control Strategy, [31]), di ottimizzare la potenza elettrica espressa dalle batterie (Power Follower Control Strategy, [31]), oppure ripartire la potenza fornita tra motore endotermico e batterie in base all'ottimizzazione di un opportuno funzionale di costo ([31]). Oltre alle soluzioni sopracitate, si deve aggiungere la possibilità di introdurre logiche di controllo basate sulla logica fuzzy [31].

In questo modello vengono implementate la Thermostat Control Strategy (TCS) e la Power Follower Control Strategy (PFCS).

Con la prima strategia (TCS), il motore endotermico lavora a punto fisso, sia in termini di regime di rotazione, che di coppia. L'idea è quella di far lavorare il motore endotermico nel punto di massimo rendimento, accendendolo e spegnendolo in base al valore istantaneo di stato di carica (SOC) del pacco batterie. Definendo con $S_g(k)$ lo stato del generatore ($S_g(k) = 1$ indica che il motore primario ed il generatore sono accesi), con SOC_U e SOC_L rispettivamente i valori limite superiore ed inferiore che si vogliono impostare per il SOC, le equazioni che descrivono la logica TCS sono riportate nella (4.51), [30].

$$S_g(k) = \begin{cases} 0, & SOC \geq SOC_U \text{ or } SOC_L < SOC < SOC_U \text{ and } S_g(k-1) = 0 \\ 1, & SOC \leq SOC_L \text{ or } SOC_L < SOC < SOC_U \text{ and } S_g(k-1) = 1 \end{cases} \quad (4.51)$$

In questo modello, si decide di porre SOC_U pari a 0.9 e SOC_L pari a 0.2, in modo da poter sfruttare un'ampia fascia di funzionamento in puro elettrico.

La corrispondente distribuzione di potenza è descritta nelle equazioni (4.52) e (4.53).

$$P_g(t) = \begin{cases} 0, & S_g(t) = 0 \\ P_e(T_{s,\eta}, \omega_{s,\eta}) \cdot \eta_g, & S_g(t) = 1 \end{cases} \quad (4.52)$$

$$P_b(t) = \begin{cases} 0, & SOC(t) < SOC_L \\ P_r(t) - P_g(t), & SOC_L \leq SOC(t) \leq SOC_U \\ P_r(t), & SOC(t) \geq SOC_U \end{cases} \quad (4.53)$$

dove P_r è la potenza richiesta per l'avanzamento, P_g e P_b sono rispettivamente le potenze espresse dalla propulsione primaria e dal pacco batterie, P_e è la potenza elettrica espressa dal generatore, diminuita del relativo rendimento. Da notare che, per non avere una corrente di

ricarica delle batterie troppo elevata, con conseguenti danni agli accumulatori stessi, non si lavora alla coppia che porterebbe ad avere il massimo rendimento del motore endotermico, ma si utilizza un valore inferiore, che dà comunque un rendimento paragonabile al valore massimo, come riportato in figura 4.15. In questo modo la potenza espressa dal generatore è pari a circa 20 kW.

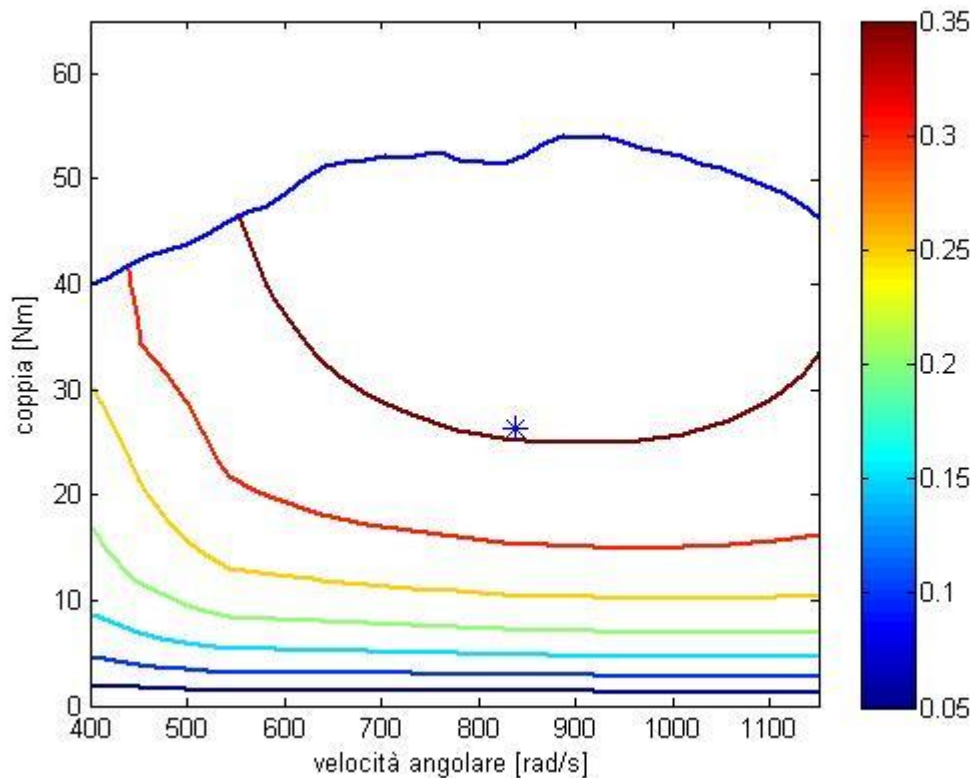


Figura 4.15 Diagramma di rendimento del motore CI e punto di lavoro nella logica TCS

La seconda logica che viene implementata in questo modello è la PFCS; in questo caso, la propulsione primaria data dal complesso motore-generatore è la principale fonte di potenza della vettura, ed il controllo ne regola il valore per seguire la richiesta di potenza relativa all'avanzamento. Il complesso moto-generatore è attivo in quasi tutte le condizioni di lavoro, tranne quando la potenza richiesta è bassa ed il valore istantaneo di SOC è superiore

al valore di SOC_U impostato. Lo stato rappresentativo del funzionamento della propulsione primaria ($S_g(k)$), è rappresentato, in funzione della potenza richiesta per l'avanzamento (P_r) e del $SOC(t)$, in figura 4.16, dove $P_{g,min}$ corrisponde alla potenza più bassa espressa dal gruppo moto-generatore con questa logica, e $P_{b,max}$ è la massima potenza in questo caso esprimibile dalle batterie.

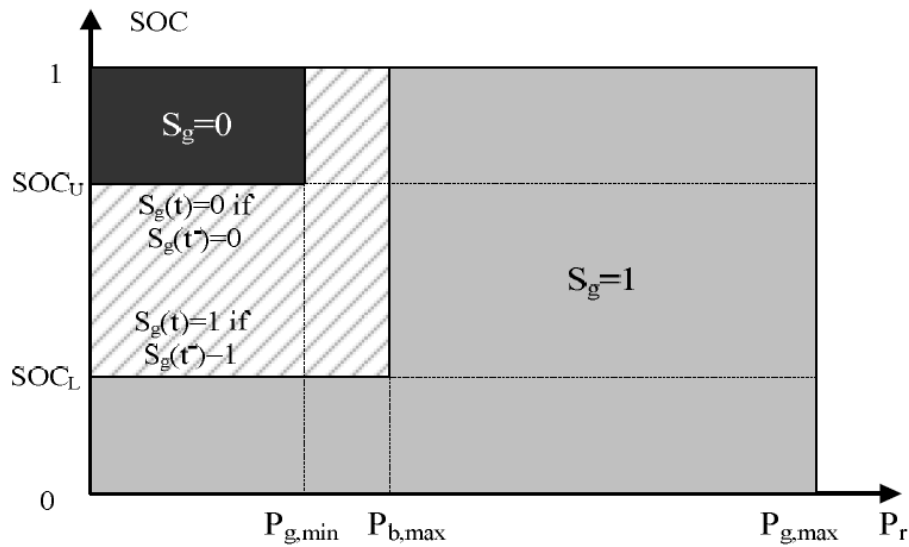


Figura 4.16: stato di servizio del gruppo motore CI-generatore

La potenza del generatore è invece riportata nell'equazione 4.54

$$P_g(t) = \begin{cases} 0, & S_g = 0 \text{ and } SOC(t) > SOC_U \\ P_{g,min}, & S_g = 1 \text{ and } SOC(t) > SOC_U \\ P_r + P_{ch} \cdot \left(\frac{SOC_U + SOC_L}{2} - SOC(t) \right), & S_g = 1 \text{ and } SOC_L \leq SOC(t) \leq SOC_U \\ P_{g,max}, & S_g = 1 \text{ and } SOC(t) < SOC_L \end{cases} \quad (4.54)$$

In questo caso, i valori di $P_{g,min}$, $P_{b,max}$ e $P_{g,max}$ valgono rispettivamente 15, 25 e 34 kW. In particolare, il valore di potenza massima espressa dal gruppo motore-generatore, corrisponde alla massima potenza esprimibile dal motore endotermico, tenendo conto dei rendimenti della parte elettrica. Il valore di P_{ch} è invece posto uguale alla differenza tra la potenza

massima esprimibile dal generatore e quella richiesta per l'avanzamento. Questo valore viene poi mediato in funzione del valore istantaneo assunto dal SOC: in particolare, se il SOC è basso (ossia inferiore al valor medio del SOC, pari a $SOC_m = \frac{SOC_U + SOC_L}{2} = 0.55$), alla potenza necessaria per l'avanzamento viene sommato un termine relativo alla ricarica delle batterie, e viceversa nel caso in cui il SOC sia superiore al valore di SOC_m .

Da notare che, con queste logiche, si evita il problema delle continue accensioni (e relativi spegnimenti) del motore endotermico, diminuendone quindi le fasi transitorie, ed eliminando i conseguenti aumenti di consumo.

Nella logica PFCS, il pacco batterie funziona da equilibratore della potenza, caricandosi e scaricandosi. Le equazioni che rappresentano la logica di controllo relativa alle batterie è riportata nella (4.55)

$$P_b(t) = \begin{cases} P_r(t) - P_g(t), & S_g = 1 \\ P_r(t), & S_g = 0 \end{cases} \quad (4.55)$$

Si ricorda infine che, in questa trattazione, l'obiettivo non è quello di scegliere quale tra le innumerevoli possibilità descritte in letteratura sia la strategia di controllo migliore ma, in questo caso, si decide di imporre queste due logiche perché sono tra le più diffuse, e con esse determinare quali risultati si determinino nella gestione della vettura in esame.

4.9 Dati di targa e prestazioni dei componenti

In questo paragrafo si elencano le caratteristiche dei componenti installati sul prototipo bimodale.

4.9.1 Motoruote

In Tabella 4.1 sono riportati i dati di targa di ogni singola motoruota in esame, mentre in Figura 4.16 è riportata la caratteristica del motore, con le curve iso-rendimento.

Potenza nominale	kW	8.6
Coppia nominale	Nm	133.46
Coppia massima	Nm	333.65
Tensione nominale concatenata	V	150
Coppie polari		16
Pulsazione nominale meccanica	rad/s	64.73
Momento d'inerzia rotorico	kg·m ²	0.1
Momento d'inerzia statorico	kg·m ²	0.076
Costante di coppia	Nm/A	2.3
Flusso magnetico rotorico	Wb	0.14

Tabella 4.1 Dati di targa di una motoruota

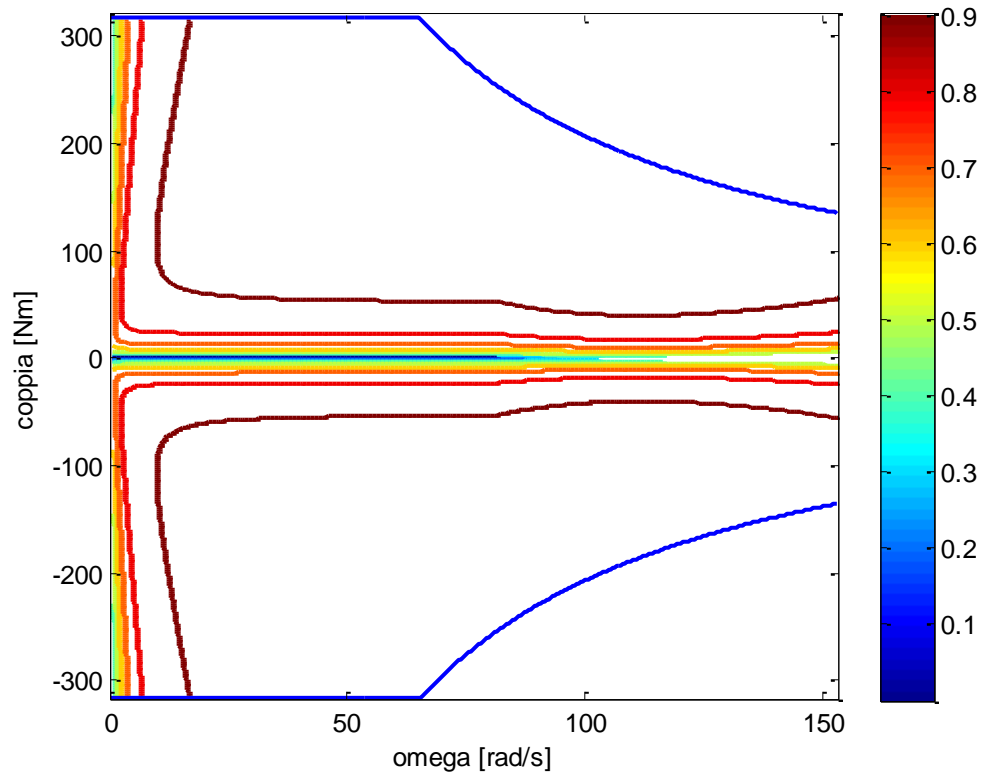


Figura 4.16 Campo di operatività della motoruota (motore ed inverter) con le linee isorendimento

4.9.2 Batterie

In Tabella 4.2 si riportano le principali caratteristiche del sistema di accumulo; in Figura 4.17 e 4.18 è riportato l'andamento della tensione e della resistenza interna in funzione dello stato di carica, mentre la dipendenza della tensione dalla temperatura è definita dalla (4.56)

$$E_0 = E_{0\ 20\ ^\circ\text{C}} \cdot (C_1 \cdot T^2 + C_2 \cdot T + C_3) \quad (4.56)$$

dove:

$$C_1 = -9.2389 \cdot 10^{-6}; C_2 = 1.2704 \cdot 10^{-3}; C_3 = 9.7402 \cdot 10^{-1}$$

T [°C] è la temperatura in gradi.

Tipo di batteria	Litio-Polimeri
Numero di elementi	68 in serie
Capacità	40 Ah
Massa totale	74.8 kg
Corrente massima in carica	-80 A
Corrente di picco in scarica	400 A
Corrente continua in scarica	200 A

Tabella 4.2 Caratteristiche delle batterie

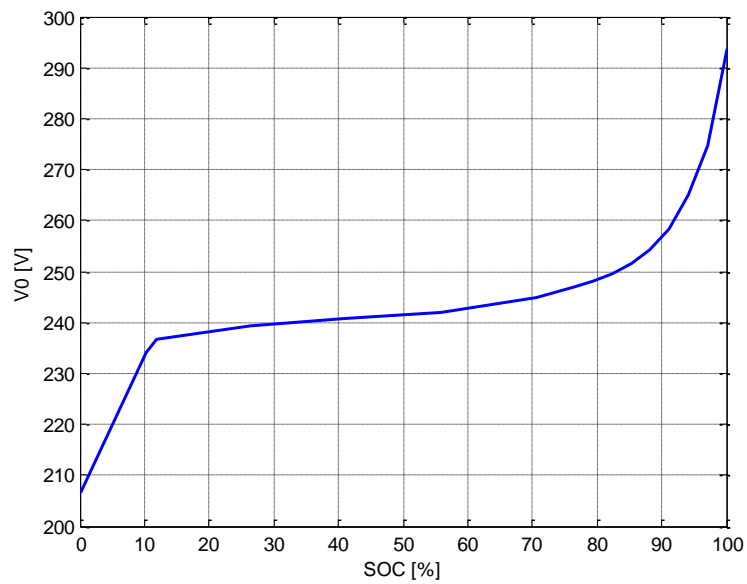


Figura 4.17 Tensione erogabile in funzione del SOC

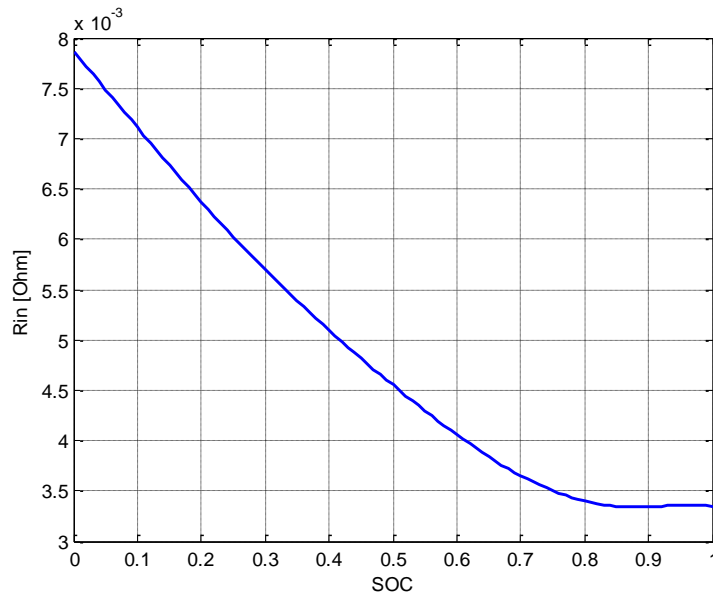


Figura 4.18 Resistenza interna in funzione del SOC

4.9.3 Motore endotermico

Si riportano di seguito i principali parametri del motore endotermico (Tabella 4.3), ed in Figura 4.19 la curva di coppia massima, con le isorendimento del propulsore.

Potenza massima	48 kW
Coppia massima	53 Nm
Velocità di lavoro	8000 rpm
Alimentazione	benzina
Cilindrata	550 cm ³

Tabella 4.3 Dati caratteristici del motore endotermico

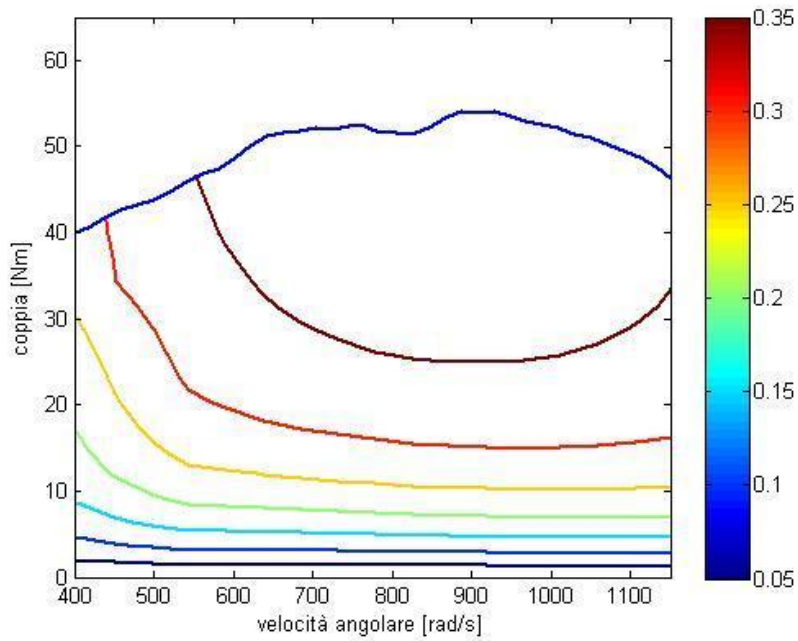


Figura 4.19 Linee isorendimento del motore CI

4.9.4 Generatore

Si riportano di seguito i parametri del generatore (Tabella 4.4).

Coppia nominale	63 Nm
Velocità nominale	842 rad/s
Corrente nominale	101.83 A
Corrente massima	224.57 A
Rendimento alla potenza nominale	0.96
Resistenza interna	0.0128 Ohm

Tabella 4.4 Dati caratteristici del generatore

Capitolo V

Risultati delle simulazioni

In questo capitolo vengono condotte le verifiche numeriche necessarie per testare la correttezza del modello descritto nel capitolo IV. I risultati delle simulazioni sono necessari da un lato per confermare alcune scelte fatte nel corso del dimensionamento degli organi di trazione (ad esempio l'autonomia, il consumo di energia elettrica), dall'altro per avere dei riscontri sulla validità e sulle caratteristiche principali delle due logiche di controllo implementate, la TCS e la PFCS (si veda § 4.8).

5.1 Ciclo ECE

In particolare, per il ciclo normato ECE, si vogliono valutare le seguenti grandezze:

- Autonomia e consumo in puro elettrico, determinando l'effetto dell'azione frenante elettrica.
- Consumo di combustibile per un ciclo di ricarica, valutando le logiche implementate (TCS e PFCS).
- Consumo equivalente.

5.1.1 Presentazione del ciclo

In questo caso, si studiano le differenze nel caso sia sempre attivata (best case) o sempre disattivata (worst case) la frenata elettrica, con lo scopo di quantificare il vantaggio di questa risorsa per un veicolo come quello analizzato. I dati relativi all'autonomia ed al consumo di energia elettrica, ricavati su una percorrenza di due cicli ECE, vengono poi verificati eseguendo diversi cicli ECE in serie, in modo da scendere fino al 20% dello stato di carica (SOC) delle batterie, che è il valore limite impostato nel calcolo dell'autonomia in puro elettrico, per non danneggiare gli accumulatori. Si ricorda che, nel caso di partenza con le batterie completamente cariche, il gestore di bordo impone la frenata meccanica finché lo stato di carica non è sceso sotto l'85%, per evitare sovracorrenti in ingresso alle batterie.

L'autonomia del veicolo viene testata nell'ipotesi di stato di carica degli accumulatori completo alla partenza (full charge SOC=100%). Il risultato atteso deve essere almeno pari ai 50.32 km previsti come autonomia di progetto. Poiché il dato ipotizzato inizialmente sul consumo di energia elettrica è assolutamente cautelativo, ci si aspetta che i 50.32 km di autonomia siano abbondantemente garantiti, arrivando così ad avere un consumo effettivo minore rispetto a quello ipotizzato inizialmente (si veda § 3.3.1). Per un ciclo ECE, le massime potenze richieste non superano i 25 kW, per cui non c'è differenza tra la logica TCS e la PFCS, nella fase di scarica (si veda § 4.8). Nel ciclo EUDC invece, poiché questa soglia di potenza richiesta viene superata, si verificherà la fase di scarica delle batterie del veicolo con entrambe le logiche di controllo (cfr. § 5.2.2).

Si riporta innanzitutto quale sia la richiesta del ciclo considerato, in termini di velocità del veicolo, per due cicli ECE in serie, ed il rendimento del singolo azionamento (motoruota ed inverter-da notare che, indipendentemente dai valori di SOC e dalla logica di controllo considerata, il rendimento del motore elettrico è lo stesso, a parità di ciclo di riferimento considerato)

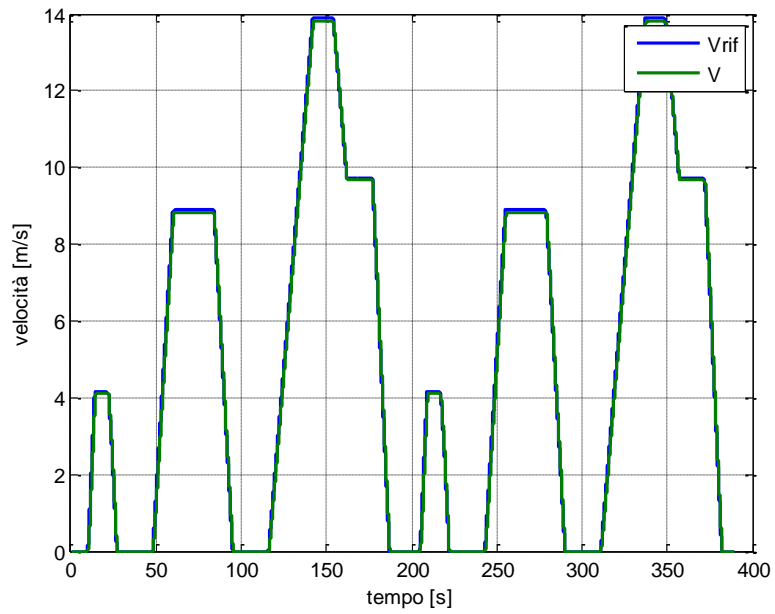


Figura 5.1 Profilo di velocità ECE. In blu il riferimento, in verde il risultato numerico

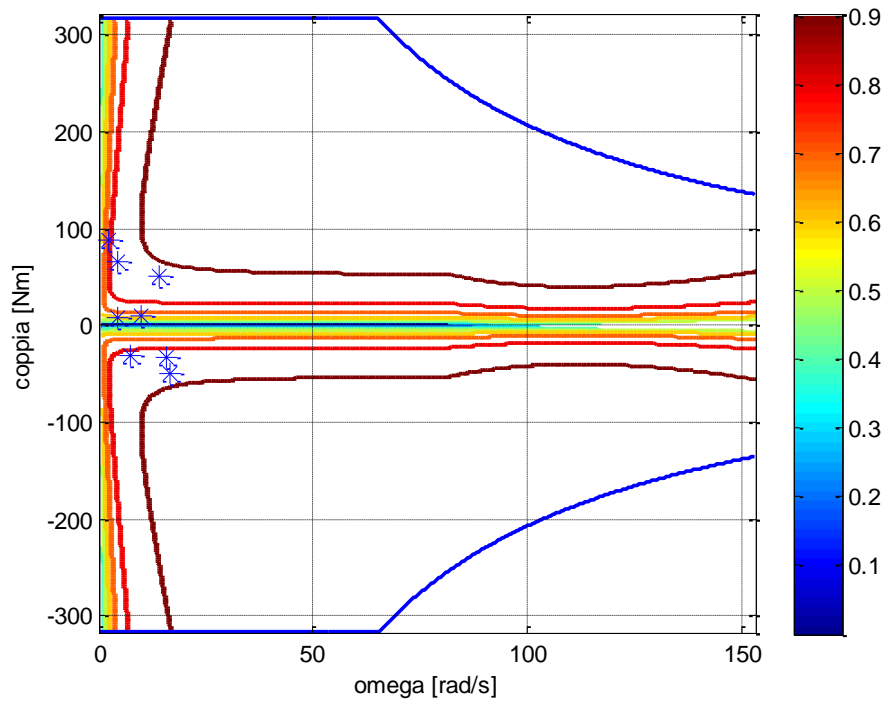


Figura 5.2: Rendimento del singolo azionamento

Dalla Figura 5.1 si riscontrano le buone prestazioni del veicolo ibrido, mentre dalla Figura 5.2 si nota come il ciclo ECE richieda coppie e velocità ampiamente all'interno del campo di operatività del motore.

5.1.2 Verifica dell'autonomia in puro elettrico

Operata questa verifica preliminare, si può rivolgere l'attenzione a quale sia il costo energetico sostenuto. L'indicatore più funzionale a questo scopo è lo *State of Charge* (SOC) delle batterie, il cui grafico è riportato in Figura 5.3

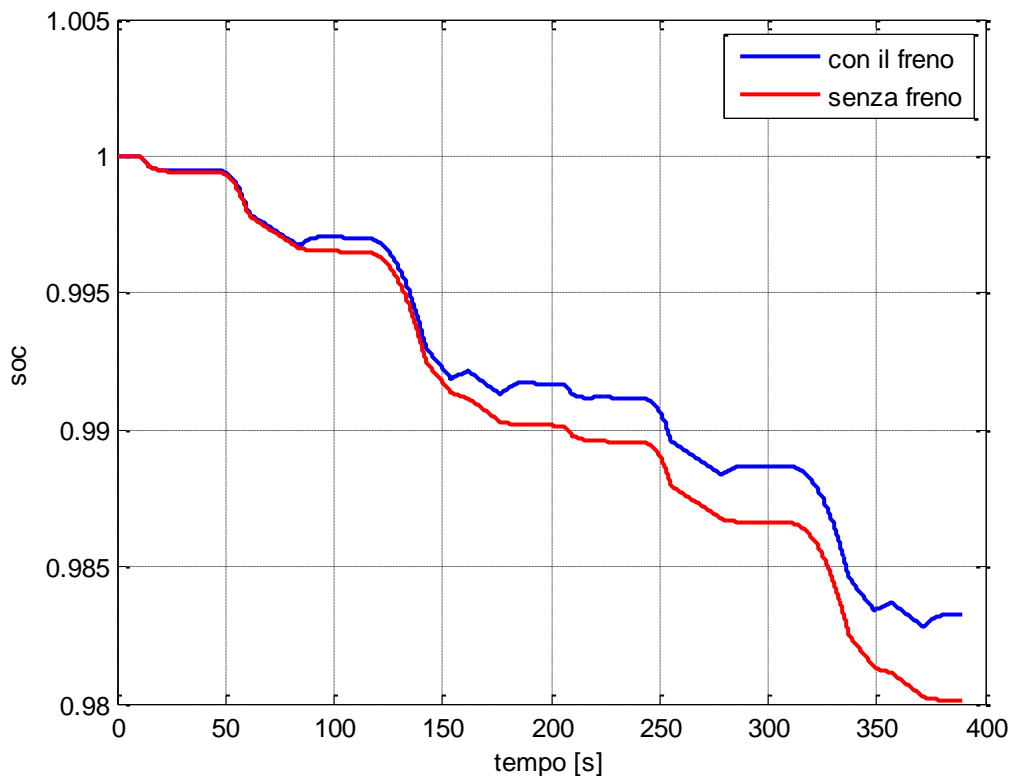


Figura 5.3 Diminuzione della carica negli accumulatori per ciclo ECE in puro elettrico

Si valuta quindi se l'autonomia garantita dal veicolo in esame è uguale (o superiore) a quella determinata durante il dimensionamento delle batterie, che è pari a 50.32 km.

Si osserva che, nel caso di freno elettrico disattivato, la diminuzione si attesta nell'ordine del 2%. Il dato non deve sorprendere, perché le prestazioni per il ciclo in analisi sono tutto sommato contenute (la velocità massima è di 50 km/h e viene mantenuta solo per una decina di secondi) e lo spazio percorso nei 388 s indicati dalla norma è di 2000 m. Con un semplice calcolo è possibile perciò quantificare che la percorrenza di circa 50 km in ciclo urbano corrisponde ad affiancare cinquanta cicli ECE. Se si suppone, in maniera del tutto plausibile, che ogni ciclo comporterà il medesimo tasso di scarica delle batterie, è possibile scrivere

$$\Delta_{soc50km} = \Delta_{socECE} \cdot n_{ECE} = 50\% \quad (5.1)$$

Si trova quindi che, dopo 50 km di percorso urbano normato, le batterie hanno ancora un SOC pari al 50%, per cui l'autonomia è ampiamente garantita. Questo risultato porta inoltre a riconsiderare l'ipotesi iniziale fatta sul consumo di energia per chilometro. Il dato di 0.16 kWh/km è quindi, come si era già ipotizzato, decisamente sovrastimato. Le cause principali di questo scostamento si trovano nel fatto che la stima era stata effettuata per un'auto di circa 350 kg più pesante, che era equipaggiata con un motore asincrono che lavorava sempre al limite delle sue caratteristiche; in questo caso invece, si utilizzano motori brushless, che hanno rendimenti più elevati rispetto all'asincrono, e non lavorano intorno al limite massimo delle rispettive caratteristiche. In questo caso inoltre, non si ha la trasmissione meccanica a bordo, ma quella elettrica, che ha un rendimento maggiore. Si può quindi valutare quale sia il consumo effettivo guardando la Figura 5.4.

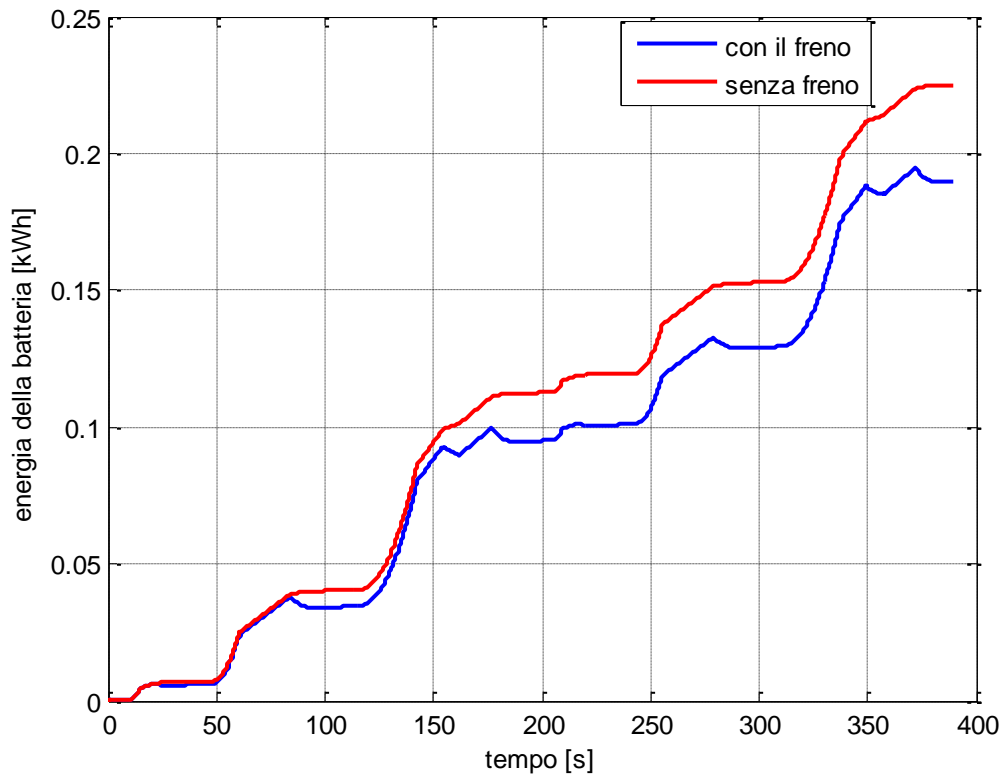


Figura 5.4 Cumulata dell'energia consumata in ciclo ECE

Il valore di energia al secondo 388 corrisponde al consumo per compiere due cicli. Noto poi che la distanza percorsa in un ECE è di 1 km, si ottiene la misura del consumo al chilometro, calcolato numericamente, per questo veicolo ibrido serie con configurazione innovativa. Il dato così ottenuto, nel caso peggiore dal punto di vista del consumo di energia elettrica, è di $0.1125 \frac{kWh}{km}$. Ne consegue che, con l'energia stoccata a bordo secondo il dimensionamento realizzato (§ 3.3.1), l'autonomia effettiva per un percorso urbano, senza frenatura elettrica, sia pari a:

$$\begin{aligned}
 \text{autonomia effettiva [km]} &= \frac{\text{energia disponibile [kWh]}}{\text{consumo} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right]} = \\
 &= \frac{10.064 \cdot 0.8 \text{ kWh}}{0.1125 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}} = 71.57 \text{ km}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Per quanto riguarda il caso ideale dal punto di vista dei consumi, nel quale la frenatura elettrica è sempre attivata, dalla Figura 5.3 si vede che, su un percorso di 2 km, il SOC diminuisce dell'1.68%; questo fa sì che, per un percorso urbano normato di 50 km, la diminuzione del SOC si attesti al 42%, garantendo nettamente l'autonomia prevista di 50.32 km. Dalla Figura 5.4 si vede come l'energia spesa dalla batteria, nel caso di frenata elettrica attivata, sia pari a 0.19 kWh, per un consumo pari a $0.095 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$. In questo caso l'autonomia in puro elettrico sarebbe pari a circa 84.7 km. Si riportano i grafici delle coppie elettrica e meccanica nei due casi. Si nota come la coppia elettrica non sia mai negativa nel primo caso, dove la frenata è totalmente meccanica, mentre nel secondo caso la frenata è totalmente elettrica.

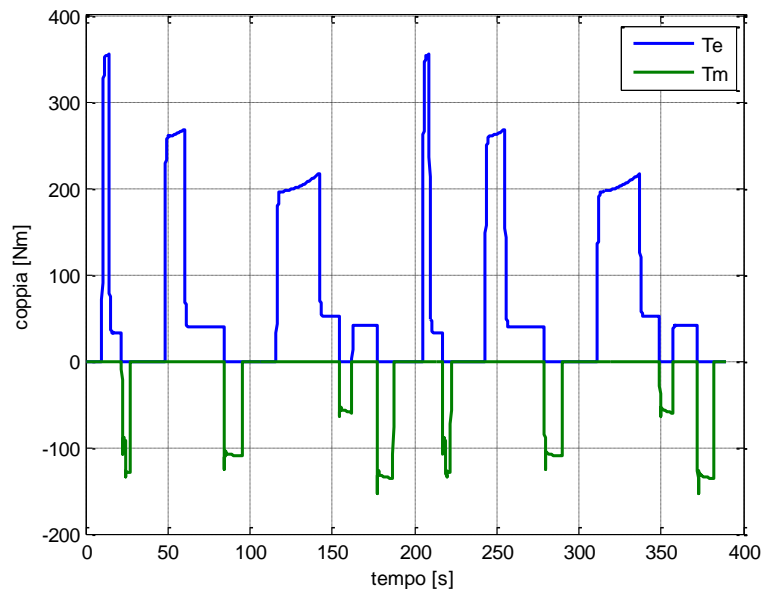


Figura 5.5 Coppie elettrica (blu) e meccanica (verde) nel caso di frenata elettrica disattivata

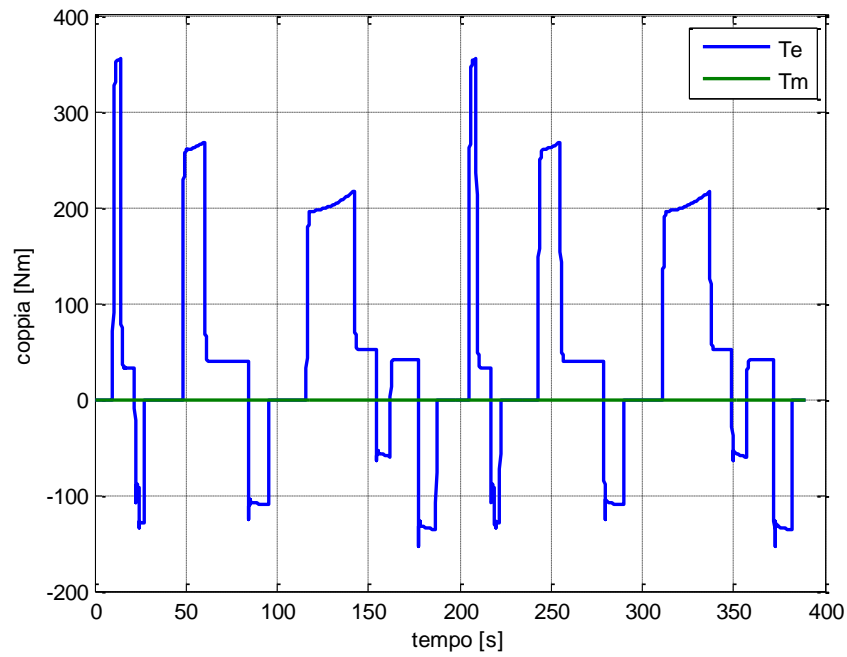


Figura 5.6 Coppie elettrica (blu) e meccanica (verde) nel caso di frenata elettrica attivata

Si effettua ora la verifica dei limiti determinati, eseguendo un ciclo intero di scarica (il SOC passa dal 100 al 20%), con la frenata elettrica attivata sotto l'85% del SOC.

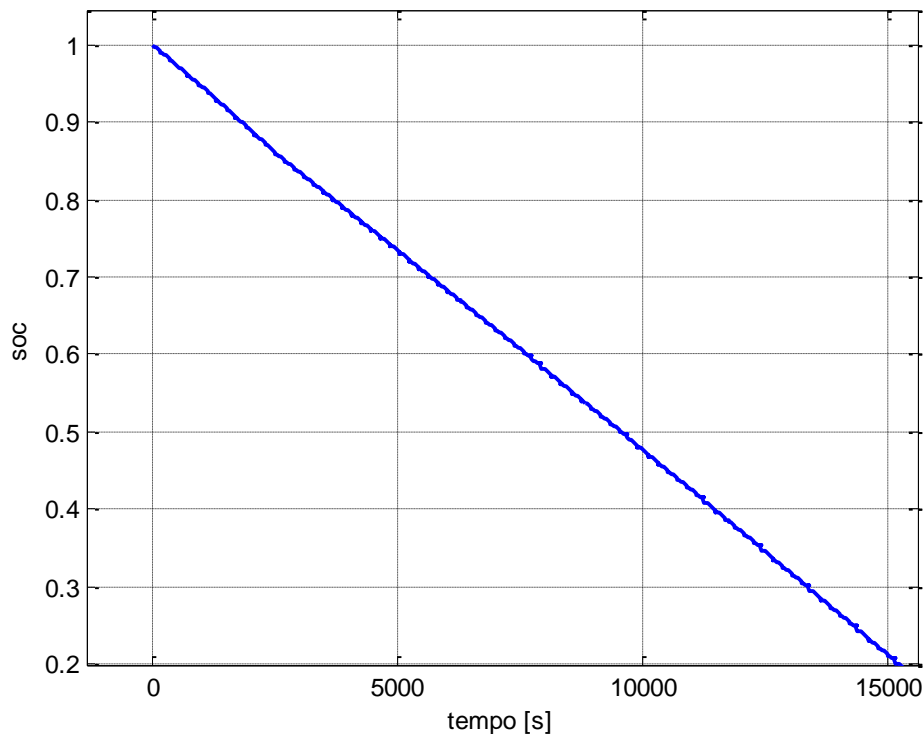


Figura 5.7 Andamento del SOC per un ciclo totale di scarica (freno elettrico attivo sotto l'85% del SOC)

Dalla Figura 5.7 si osserva come sotto l'85% del SOC la pendenza della curva di scarica diminuisca leggermente, poiché viene attivata la frenata elettrica. In particolare, per un ciclo intero di scarica, si ha un consumo medio pari a circa $0.1 \frac{kWh}{km}$, per un'autonomia di circa 80 km. Si verifica quindi come questo dato sia compreso tra i due estremi (best case e worst case) calcolati in precedenza. Si può inoltre ragionevolmente supporre che il consumo effettivo sarà comunque maggiore perché, mantenendo la frenata elettrica attiva sotto l'85% del SOC, per motivi di guidabilità e di comfort spesso si affianca il freno meccanico a quello elettrico. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva circa l'autonomia in puro elettrico per il veicolo ibrido serie con quattro motoruote indipendenti in esame, calcolata sul ciclo normato ECE.

	Frenatura meccanica	Frenatura elettrica	Frenatura elettrica sotto l'85% del SOC
Consumo [$\frac{kWh}{km}$]	0.1125	0.095	0.1
Autonomia [km]	71.57	84.7	80
% rispetto all'autonomia di progetto	+42	+68.3	+60

Tabella 5.1 Riassunto delle valutazioni circa l'autonomia, per il ciclo ECE

Dalla Tabella 5.1 si nota quindi come l'autonomia prevista di 50.32 km sia ampiamente garantita, poiché il dimensionamento delle batterie è stato effettuato in modo assolutamente cautelativo, dal punto di vista energetico. Poiché in questo modo si garantisce anche una fase di accelerazione in puro elettrico con valori elevati di potenza di picco (si veda § 5.2.1), si mantiene questo dimensionamento.

5.1.3 Valutazione della ricarica a bordo

Si vogliono ora valutare le principali grandezze elettro-meccaniche della vettura in esame, nella fase di ricarica delle batterie, utilizzando le due logiche implementate per questo modello. Per poter effettuare un confronto tra le due logiche, si esegue lo stesso ciclo di ricarica: il valore iniziale del SOC è pari al 20%, quello finale al 55%. Con riferimento al paragrafo 4.8, i valori di SOC_U e SOC_L per le logiche TCS e PFCS sono rispettivamente pari a 55% e 20%, 90% e 20%. Si vuole principalmente valutare il tempo di ricarica ed il consumo di carburante, oltre alle grandezze elettro-meccaniche della vettura. In questo caso non si distingue tra condizione di frenatura elettrica attivata o disattivata, poiché la quantità di energia in ingresso alle batterie dovuta a questa fonte è piccola se confrontata con quella che proviene dal motogeneratore. Si riportano di seguito i grafici della potenza richiesta (P_r -blu), potenza espressa dal generatore (P_g -verde), e delle batterie (P_b -rosso) per la logica TCS.

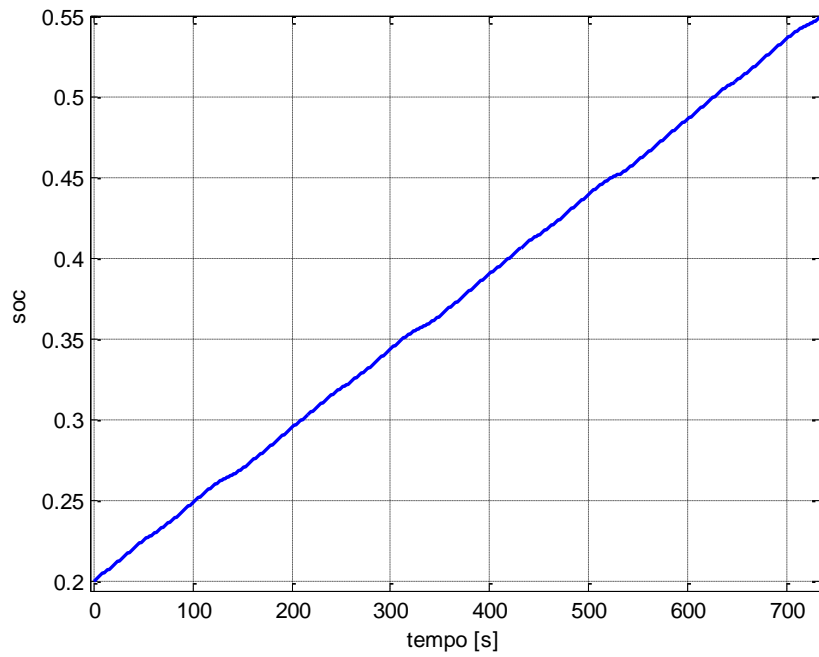


Figura 5.8 Andamento del SOC per la logica TCS

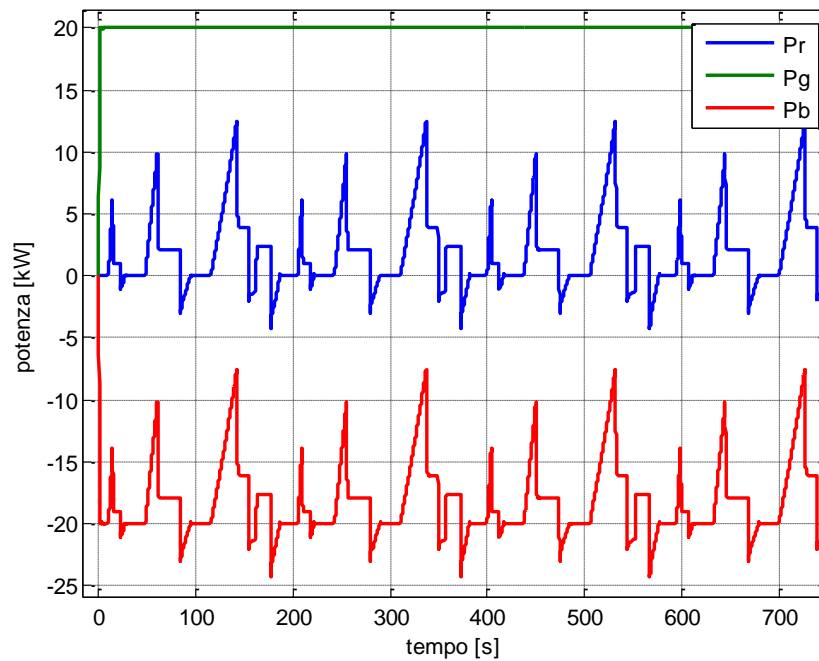


Figura 5.9 Andamento delle potenze per la logica TCS

Dalla Figura 5.9 si nota come la logica TCS faccia lavorare il motore endotermico a potenza costante (n condizioni di regime), indipendentemente dai valori assunti dalla potenza richiesta per l'avanzamento. La differenza tra la potenza fornita dal generatore e quella richiesta dal moto corrisponde alla potenza che fluisce verso le batterie (Figura 5.10). I valori massimi della potenza entrante in batteria (negativa per le convenzioni di segno adottate) si hanno nelle zone in cui si verifica una frenata: l'energia recuperata contribuisce infatti in maniera attiva alla ricarica dei sistemi di accumulo. Lo stesso andamento della potenza si ritrova in Figura 5.11, per la corrente di ricarica.

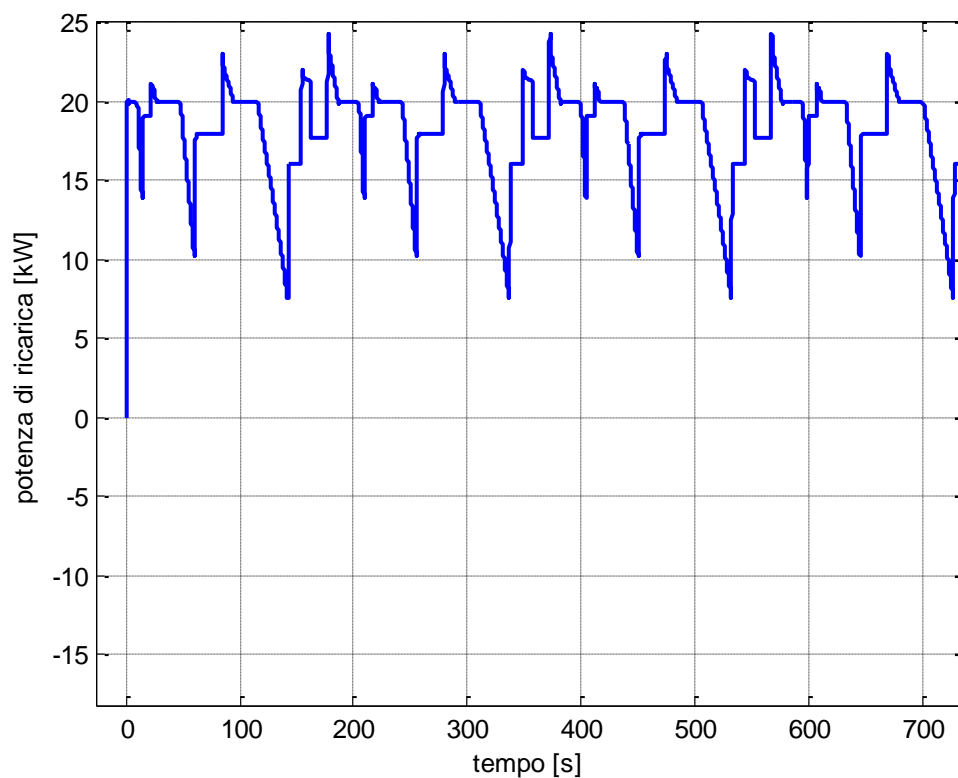


Figura 5.10 Potenza di ricarica per la logica TCS

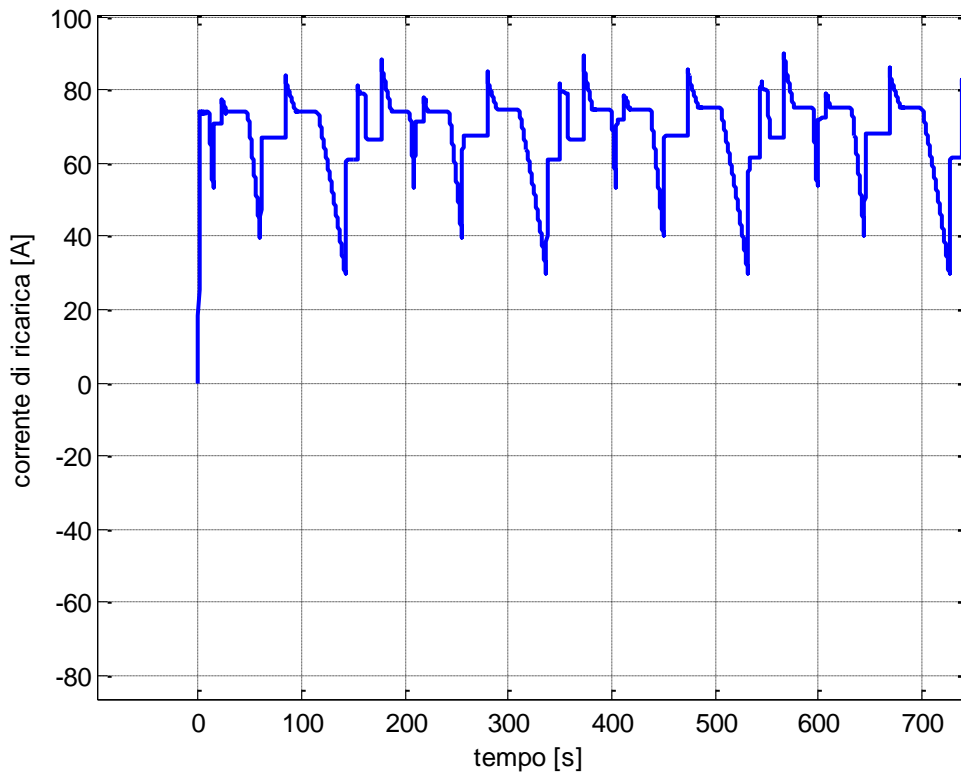


Figura 5.11 Corrente di ricarica per la logica TCS

La Figura 5.11 permette di verificare quale sia la massima corrente di ricarica. La potenza netta generata dalla propulsione primaria, pari a 20 kW, porta a raggiungere il limite di 80 A (ed a superarlo, per brevi istanti di tempo), che è la corrente massima che le batterie possono ricevere in ingresso. Si riporta di seguito il punto di funzionamento del motore endotermico che, in questa logica, è unico. La velocità angolare è infatti fissa a 8000 rpm ≈ 838 rad/s (cfr § 3.3.2 e § 3.3.3) e la potenza netta è vincolata a 20 kW per non incorrere in problemi di sovracorrenti. La scelta del valore di coppia è quindi univoca: in maniera soddisfacente si riscontra comunque che tale scelta porta a lavorare in una zona di rendimento elevato del motore endotermico assunto.

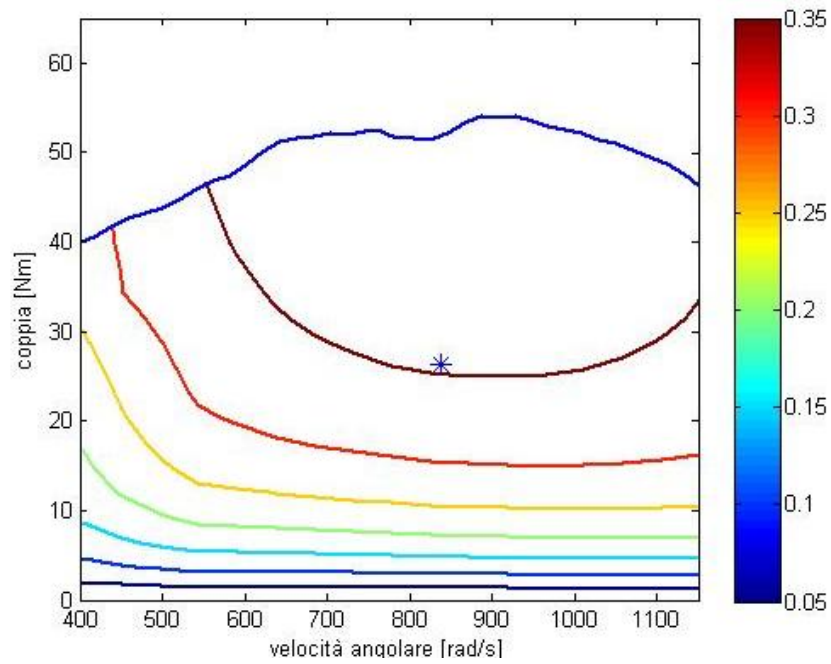


Figura 5.12 Diagramma di rendimento del motore CI e punto di lavoro nella logica TCS

Si riporta di seguito il grafico del flusso di carburante che, integrato nel tempo, determina il consumo di carburante necessario per la fase di ricarica, con la logica TCS.

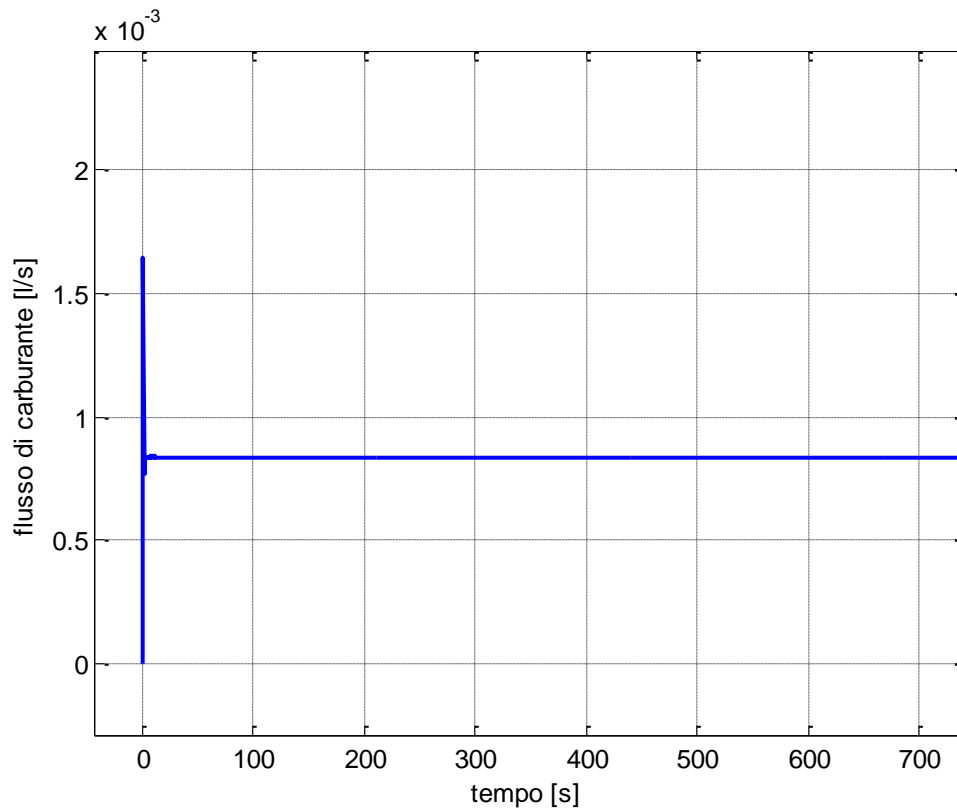


Figura 5.13 Flusso di carburante per la logica TCS

Come si nota dalla Figura 5.13, dopo un transitorio legato alla fase dell'accensione del motore, il flusso si stabilizza ad un valore costante, poiché sia la velocità angolare che la coppia del motore endotermico sono costanti.

In conclusione, la TCS da un lato porta quindi all'ottimizzazione della propulsione primaria, ma dall'altro tende a diminuire la vita e l'efficienza delle batterie e di tutti i componenti elettrici presenti nel sistema, a causa delle continue e significative variazioni delle grandezze elettriche. Dalla Figura 5.8 si nota inoltre come la ricarica venga effettuata in circa 737 secondi, con un consumo di 0.6181 l su un percorso di circa 3.68 km, per un consumo specifico di circa $16.8 \frac{l}{100 km}$.

Si riportano di seguito i grafici relativi ad una fase di carica con la logica PFCS.

La Figura 5.14 permette di osservare come la fase di ricarica faccia tendere il SOC al valore di 0.55, coerentemente con le equazioni che esprimono la potenza del generatore, nella logica PFCS (cfr § 4.8).

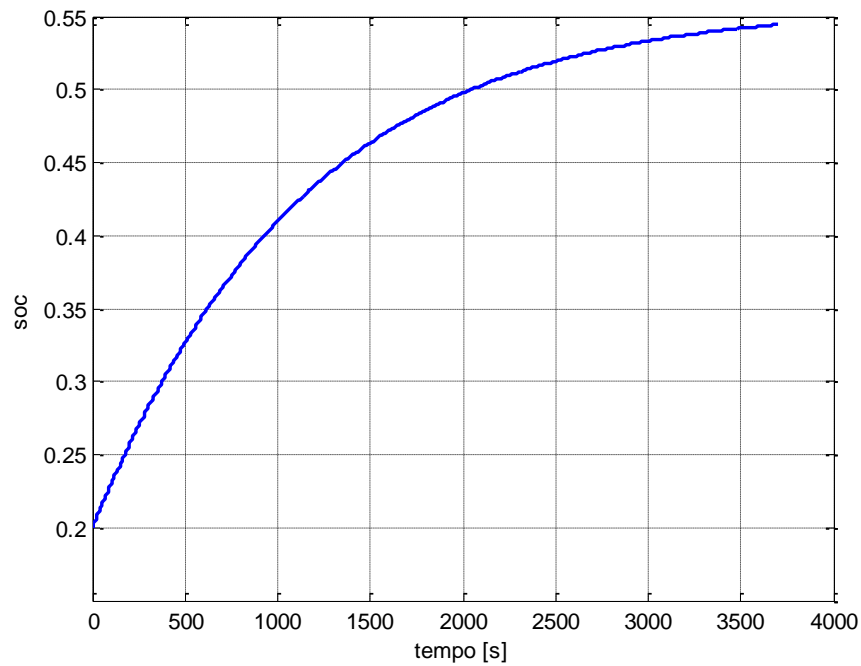


Figura 5.14 Andamento del SOC per la logica PFCS

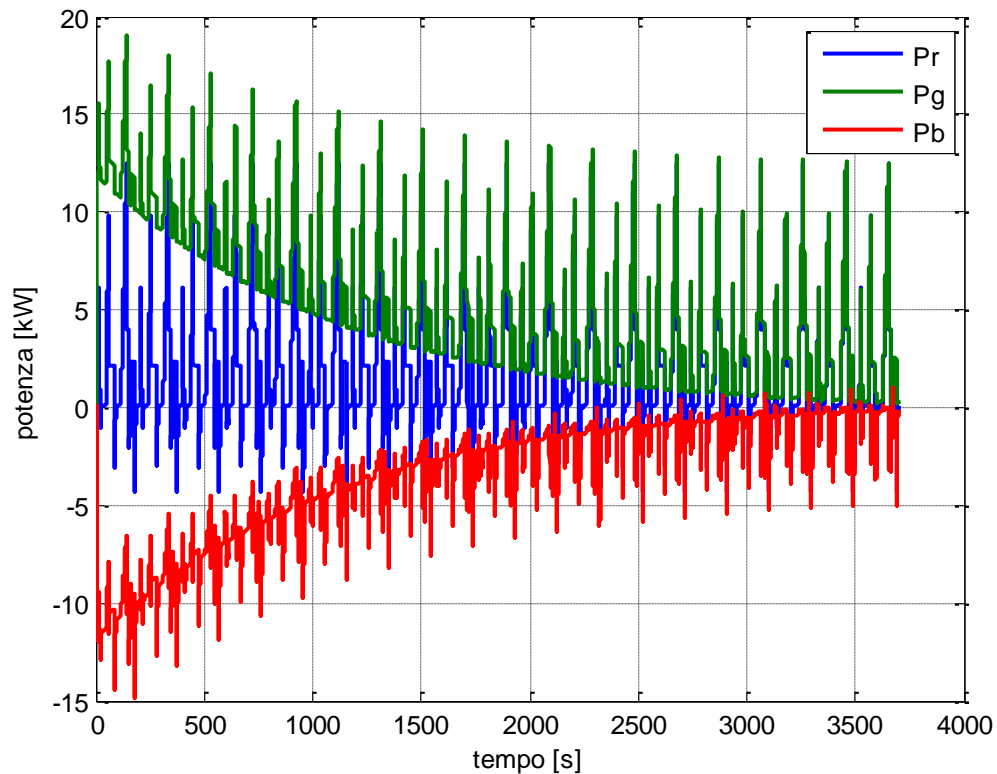


Figura 5.15 Andamento delle potenze per la logica PFCS

Dalle Figure 5.15-17 si vede come la logica PFCS tenda a ridurre la potenza di batteria, diminuendo quindi di conseguenza le perdite di carica e scarica, oltre ad estenderne il ciclo di vita. In questo caso, la potenza del moto-generatore non è più costante, ma flessibile, e segue la richiesta, garantendo una potenza di ricarica che diminuisce all'avvicinarsi del livello di riferimento del SOC, che è pari al suo valor medio, 0.55 (si veda § 4.8). In particolare, quando il SOC arriverà a 0.55, la potenza garantita dal moto-generatore coinciderà esattamente con quella richiesta.

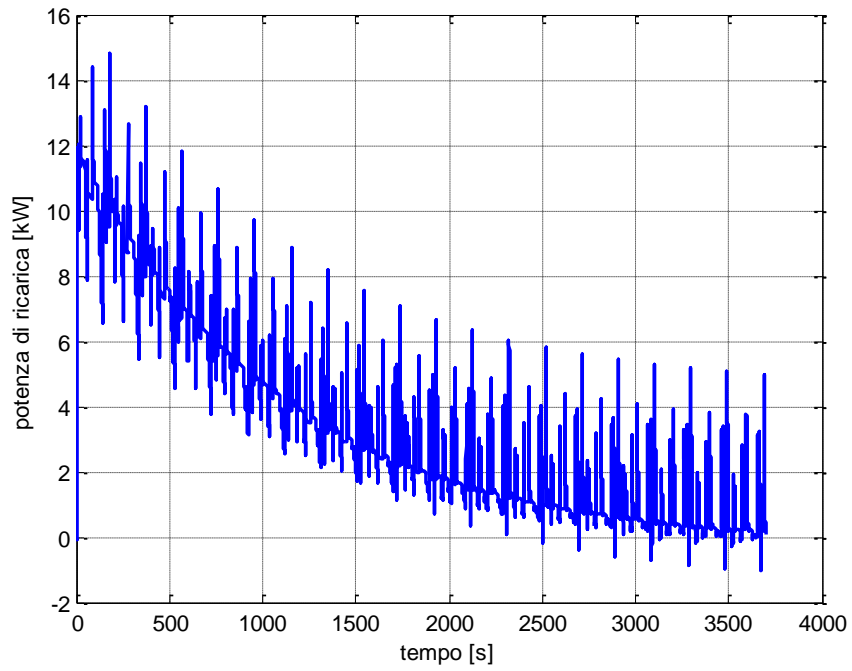


Figura 5.16 Potenza di ricarica per la logica PFCS

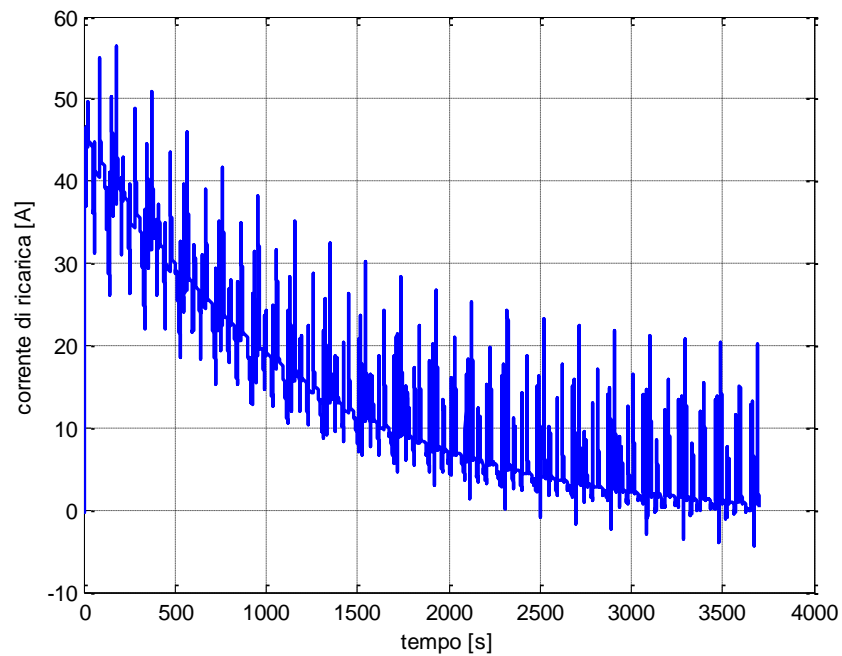


Figura 5.17 Corrente di ricarica per la logica PFCS

In questa logica, la propulsione primaria segue la richiesta, allargando di conseguenza il suo campo di utilizzo (si veda la mappa di Figura 5.18) ed allontanandosi dal punto di maggior rendimento in funzione della richiesta.

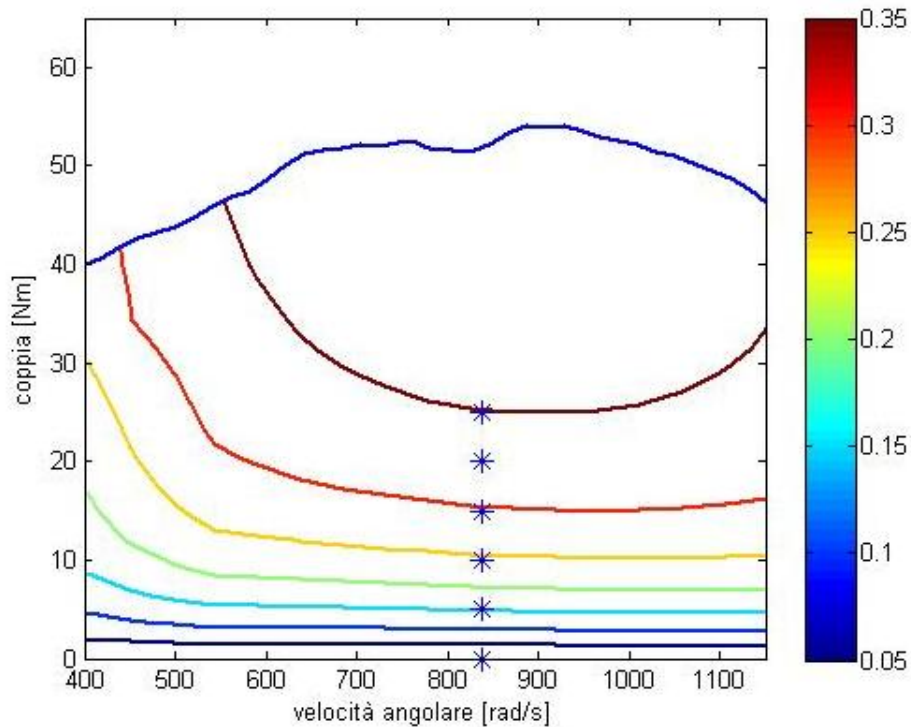


Figura 5.18 Diagramma di rendimento del motore CI e punti di lavoro nella logica PFCS

Come detto in precedenza, in questa logica la propulsione primaria segue la richiesta, minimizzando (e quindi ottimizzando) al tempo stesso le potenze di carica e scarica della batteria, ed in generale le fluttuazioni delle grandezze elettriche relative agli accumulatori. In questa logica si ha inoltre che il SOC tende ad assumere un valore di riferimento, con il vantaggio di avere sempre, all'occorrenza, una discreta autonomia in puro elettrico, ed aumentando l'efficienza ed il ciclo di vita delle batterie e dei componenti elettrici. Dalla Figura 5.19, si osserva come, dopo una perturbazione iniziale legata al transitorio di

accensione, il flusso di carburante si attesti su valori più bassi di quelli della logica TCS.

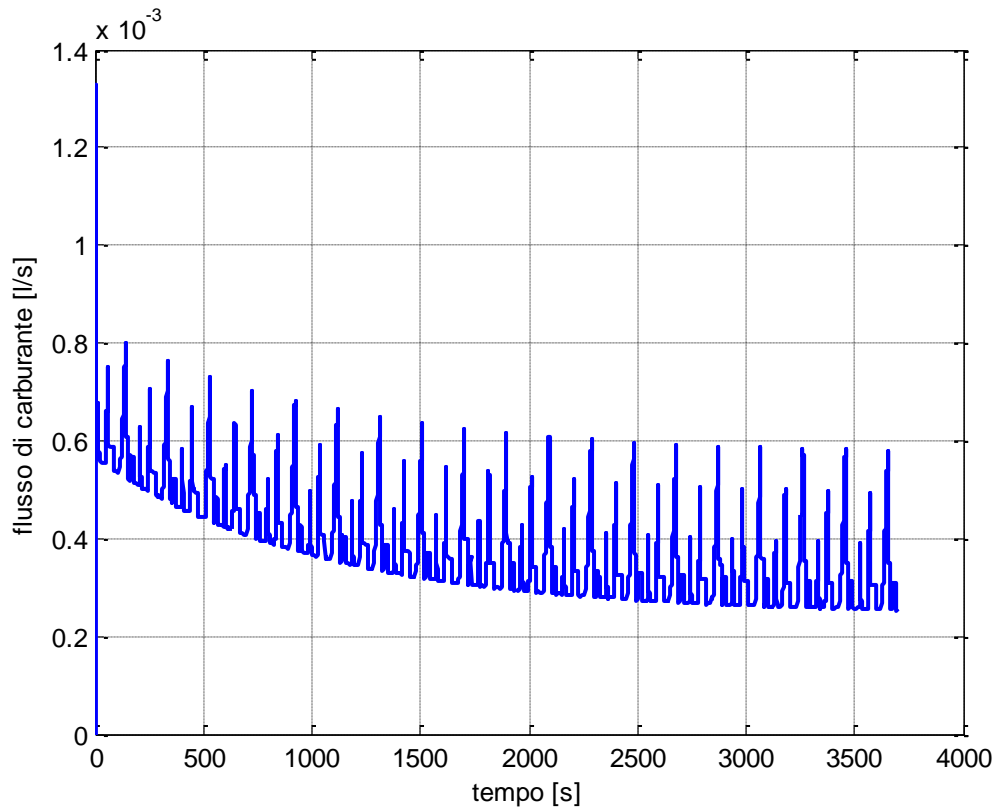


Figura 5.19 Flusso di carburante

Dalla Figura 5.14 si nota inoltre come la ricarica venga effettuata in circa 3700 secondi, con un consumo di 1.4305 l su un percorso di circa 19 km, per un consumo di $7.53 \frac{l}{100 km}$.

Di seguito si riporta una tabella comparativa dei risultati ottenuti con le due logiche, considerando che il serbatoio montato a bordo ha una capienza di 35 l e che il consumo dichiarato per la Panda 1.1 di serie è, per un ciclo urbano, di $7.2 \frac{l}{100 km}$.

Strategia di controllo	TCS	PFCS
Potenza media di ricarica [kW]	12.5	7.5
SOC iniziale %	20	20
SOC finale %	55	55
Tempo per arrivare al SOC finale [s]	737	3700
Consumo di carburante [l/100 km]	16.8	7.53
% rispetto alla logica TCS	-	-55.2%
Autonomia prevista [km]	208.3	464.8

Tabella 5.2 Riassunto delle valutazioni circa la ricarica a bordo, per il ciclo ECE

Per quanto riguarda le logiche di controllo implementate, si nota come la TCS porti ad una ricarica delle batterie in tempi contenuti, in quanto fornisce continuamente una potenza di gran lunga superiore a quella necessaria per il solo avanzamento. La logica PFCS impiega invece un tempo maggiore per arrivare al valore desiderato di SOC. In definitiva, la logica TCS ottimizza l'efficienza del solo motore endotermico, a scapito della vita utile per i componenti elettrici, mentre la logica PFCS fornisce sempre un valore di riferimento del SOC ed una condizione di sostanziale stabilità per le grandezze elettriche; questo porta ad un miglioramento dal punto di vista dei consumi di carburante, e quindi dell'autonomia prevista, ed un aumento dell'efficienza e della durata dei componenti elettrici e delle batterie.

I dati di Tabella 5.2 non possono però essere direttamente confrontati con le prestazioni che ha la vettura di serie. È necessario infatti tenere in considerazione che una parte significativa della potenza prodotta dal gruppo motogeneratore non è richiesta dal moto, ma serve per la ricarica delle batterie. Se infatti non si volesse stoccare alcuna energia durante la marcia, ma si decidesse di fornire esattamente la potenza richiesta per l'avanzamento (lavorando a velocità angolare del motore CI fissa a 8000 rpm e variando la coppia in funzione della richiesta), il consumo di carburante sarebbe di circa $5.9 \frac{l}{100 km}$. Questo dato è conforme alle aspettative, perché è da un lato vero che questa vettura è più

pesante rispetto a quella di serie (per la quale peraltro non si conoscono esattamente le condizioni operative nelle quali è stata svolta la prova per trovare il consumo in ciclo urbano), ma dall'altro si ha che il veicolo in esame non ha il sistema meccanico di trasmissione, ed ha montato un motore da 550 cc, invece del 1100 cc della vettura di serie.

Si valuta ora quale sia il consumo equivalente per la vettura in esame, per poter confrontare direttamente le prestazioni della vettura di serie con quella in esame.

Il consumo equivalente si ricava a partire dalla formula (5.3):

$$C_{eq} = C_{carb} + \Delta SOC \cdot C_{ric} \cdot 100 \left[\frac{l}{100 km} \right] \quad (5.3)$$

Dove:

C_{carb} è il consumo di carburante del motore endotermico, in $\left[\frac{l}{100 km} \right]$

ΔSOC è la differenza tra il SOC iniziale della prova e quello finale in [%]

C_{ric} è il consumo medio della ricarica della batteria a bordo veicolo, in $\left[\frac{l}{100 km} \right]$

La prova, per la logica TCS, si svolge in questo modo: si considera la quantità di carburante necessaria per una ricarica completa (dal 20% al 90% del SOC) del sistema di accumulo, misurando la distanza percorsa. Si passa quindi alla propulsione elettrica e si quantifica l'autonomia chilometrica che si ha, passando dal 90% al 20% del SOC. Il consumo di benzina determinato per la fase di ricarica viene quindi riferito alla lunghezza totale che il veicolo percorre, che è pari alla somma dei due percorsi, in endotermico ed in elettrico. Da notare che, scegliendo di condurre la prova in questo modo, il ΔSOC , e conseguentemente la seconda parte della (5.3), si annulla.

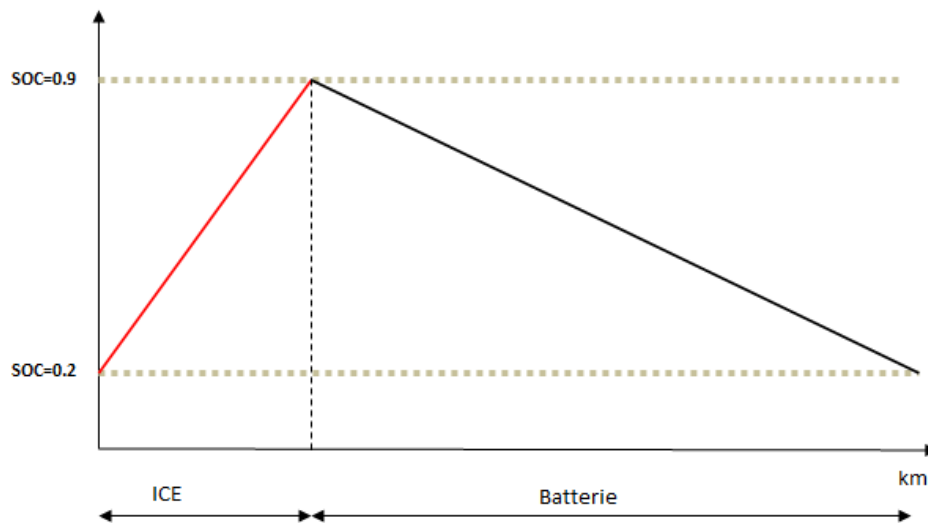


Figura 5.20. Andamento qualitativo dello SOC per la prova di consumo equivalente

Nella Figura 5.20 si dà una rappresentazione qualitativa della prova. Il tratto rosso rappresenta la fase di carica, nella quale la propulsione è endotermica; il tratto nero è invece la fase di scarica. Poiché la potenza prodotta dal moto-generatore nella TCS è costante e pari a 20 kW, molto più del necessario al moto, la rapidità con cui si caricano le batterie è elevata. La distanza percorsa in questa fase della prova, da 0.2 a 0.9 del SOC, è di 7.4 km, con un consumo di 1.2262 l. Con la carica accumulata si riescono poi a percorrere circa 68.2 km. Si sono quindi complessivamente coperti 75.6 km. Il consumo equivalente diventa quindi pari a $1.62 \frac{l}{100 km}$.

Questo dato può apparire eccessivamente positivo, rispetto ai $5.9 \frac{l}{100 km}$ necessari per garantire la sola richiesta, ma bisogna tenere in considerazione due aspetti: in primo luogo che lavorando ad un regime fisso nella zona di massimo rendimento si abbassano drasticamente i consumi specifici. Fornendo la sola potenza necessaria al moto, il motore endotermico lavora invece in zone che portano ad un rendimento massimo del 30% circa; in realtà, i punti di lavoro sono per la stragrande parte del tempo in una zona di rendimento nettamente inferiore al 30%, se si pensa che il valor medio della coppia espressa dal

motore endotermico (riportata in Figura 5.21) è pari a 2.685 Nm, che corrisponde ad un rendimento inferiore al 10%. Nella logica TCS, fissando a 20 kW la potenza netta che si garantisce con la propulsione endotermica, si lavora a punto fisso, con un rendimento costante pari a circa il 35%.

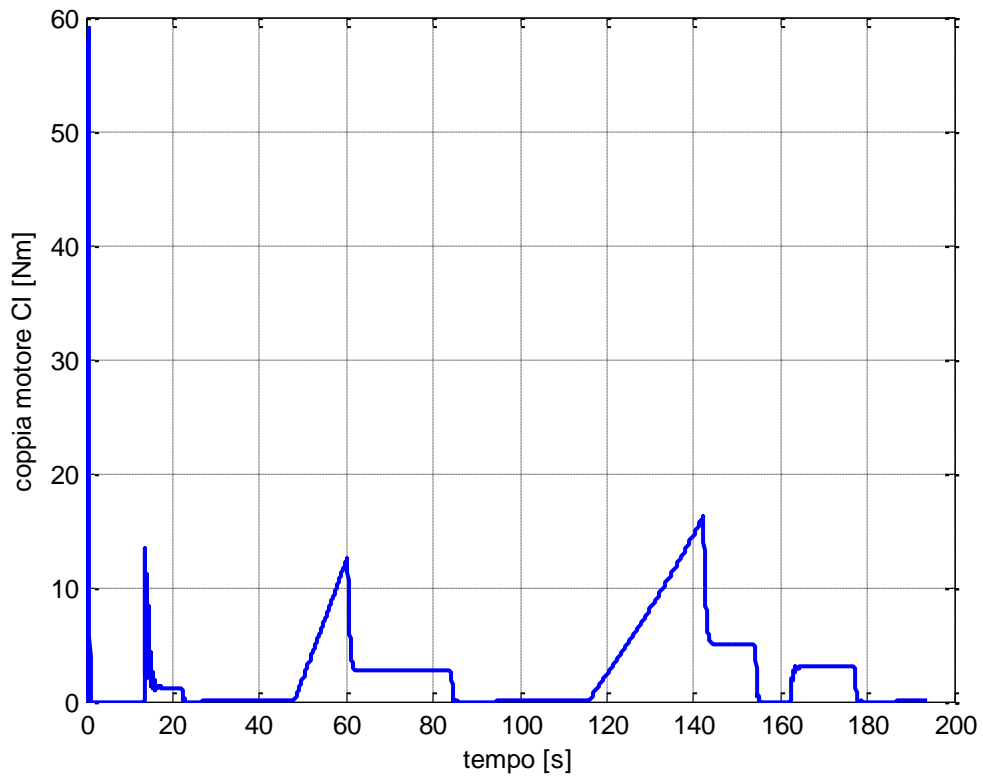


Figura 5.21 Coppia del motore endotermico nel caso debba garantire solo la richiesta

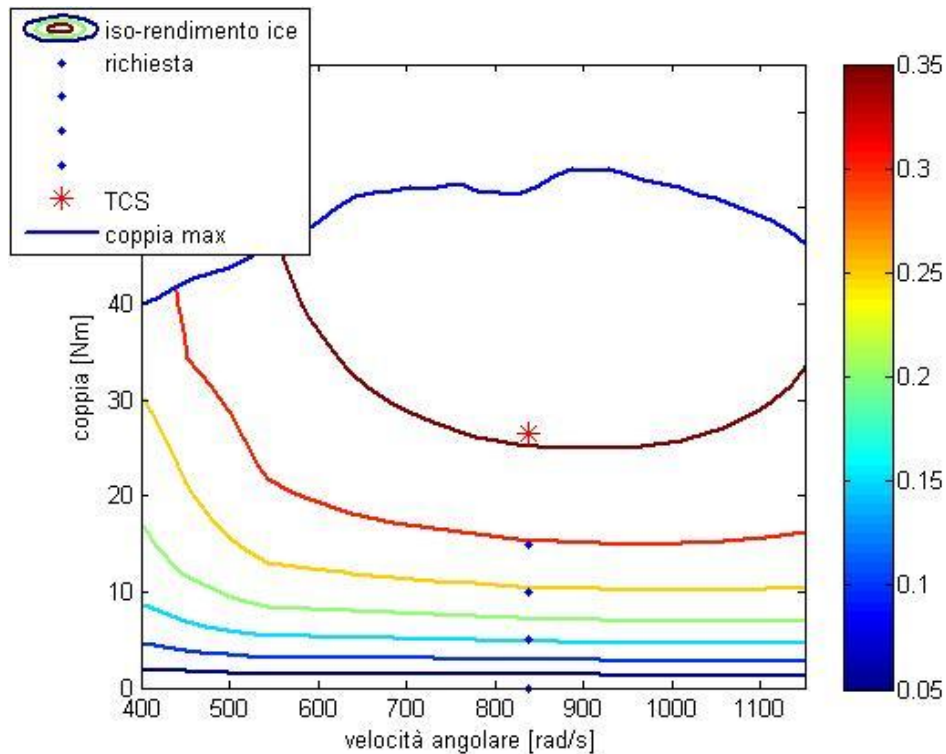


Figura 5.22 Punti di funzionamento del motore CI, nel caso debba garantire la sola richiesta e con la logica TCS

Da notare inoltre come sia molto importante il contributo dell'autonomia in puro elettrico, che vede un recupero praticamente totale dell'energia di frenatura (si attiva il freno elettrico sotto l'85% del SOC). In questo modo si passa quindi da 5.9 a $1.62 \frac{l}{100 km}$.

Si noti che questo è il caso assolutamente ideale, è il limite positivo del consumo equivalente della vettura, che nella realtà sarà inevitabilmente maggiore, a causa del fatto che il freno elettrico verrà affiancato da quello meccanico.

Si valuta ora il consumo equivalente con la logica PFCS: si effettua una prova di mantenimento della carica della batteria. Partendo da un valore iniziale di SOC pari a 0.55, si effettua una piccola fase di scarica, a seguito della quale interviene il motogeneratore, che riporta il valore del SOC a 0.55; a questo punto la logica di controllo gestisce le oscillazioni dello stato di carica, legate alla presenza del freno elettrico e dei

ritardi, facendo oscillare il SOC intorno al suo valore di regime (0.55). Considerando gli estremi di un ciclo, il termine ΔSOC nella (5.3) si annulla, e quindi il consumo equivalente corrisponde alla benzina necessaria per compiere il ciclo esaminato. In Figura 5.23 è riportato il SOC per questa prova.

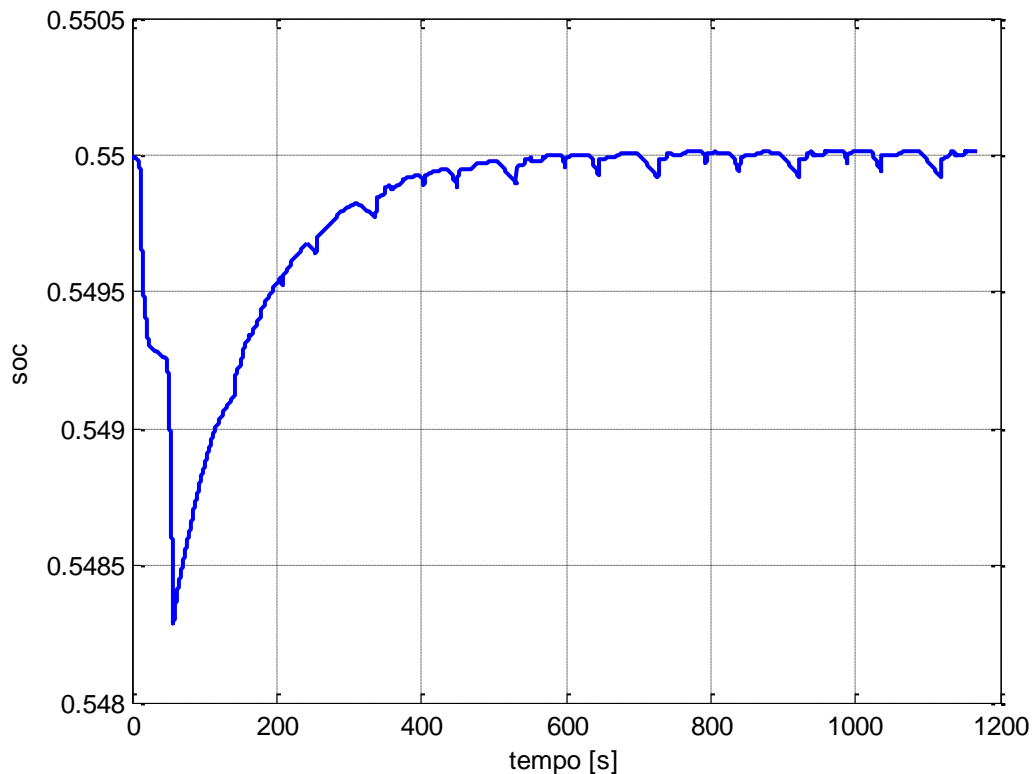


Figura 5.23 Andamento del SOC nella prova di consumo equivalente, per la logica PFCS

In questo modo si arriva ad avere un consumo di carburante pari a 0.0587 l, per un percorso di 1.014 km; si determina così un consumo equivalente pari a $5.79 \frac{l}{100 km}$. Si nota come il questo valore sia molto prossimo a quello necessario per garantire la sola richiesta; la logica PFCS lavora infatti intorno al valore di riferimento del SOC, garantendo praticamente la sola richiesta, e quindi l'efficienza del motore endotermico è fortemente penalizzata.

In definitiva, tenendo conto del fatto che il dato di consumo equivalente trovato per la logica TCS è il limite positivo per questa grandezza, si vede come la vettura ibrida serie con quattro motoruote indipendenti abbia, in generale, dei consumi migliori rispetto alla vettura di serie. Confrontando poi le due logiche, si nota come la PFCS, che segue la richiesta di potenza per l'avanzamento, abbia senso in ambito urbano solo utilizzando un motore con cilindrata più piccola del 550 in uso, oppure mantenendo il motore scelto, per un impiego non cittadino. In questi casi infatti, la logica PFCS riuscirebbe a far lavorare il motore endotermico in punti con rendimenti molto maggiori di quelli riscontrati con il motore in uso, in un ambito cittadino. Da notare inoltre che, nella prova qui effettuata, la logica PFCS tenderebbe a non sfruttare la grande capacità degli accumulatori presenti sulla vettura in esame.

Si riporta una tabella comparativa delle prestazioni delle vetture ibrida e di serie

Vettura	Panda 1100 di serie	Panda ibrida con motoruote-TCS	Panda ibrida con motoruote-PFCS
Consumo equivalente [l/100 km]	7.2	1.62	5.79

Tabella 5.3 Confronto tra la vettura di serie e quella innovativa per il ciclo ECE

5.2 Ciclo EUDC

Per il ciclo normato EUDC, si vogliono valutare le seguenti grandezze:

- Autonomia e consumo in puro elettrico, determinando l'effetto dell'azione frenante elettrica, per la logica TCS;
- Andamento del ciclo di scarica, per la logica PFCS;
- Consumo di combustibile per un ciclo di ricarica, valutando le logiche implementate (TCS e PFCS);
- Consumo equivalente.

5.2.1 Presentazione del ciclo

In questo caso, poiché la richiesta di potenza necessaria all'avanzamento supera i 25 kW, la fase di scarica delle batterie non porta agli stessi risultati, se si considerano le logiche TCS e PFCS (si veda § 4.8). In particolare, con la logica TCS ci si aspetta che venga effettuato un ciclo di scarica, per il quale si possono valutare i consumi e l'autonomia in puro elettrico, mentre ci si aspetta che la logica PFCS non porti ad una scarica completa delle batterie, ma stabilizzi il SOC al suo valore medio, pari a 0.55. Per quanto riguarda la TCS, anche in questo caso si studiano le differenze nel caso sia sempre attivata (best case) o sempre disattivata (worst case) la frenata elettrica. I dati relativi all'autonomia ed al consumo di energia elettrica, ricavati su una percorrenza di due cicli EUDC, vengono poi verificati eseguendo diversi cicli EUDC in serie, in modo da scendere fino al 20% dello stato di carica (SOC) delle batterie, che è anche in questo caso il valore limite impostato nel calcolo dell'autonomia in puro elettrico. Nel caso di partenza con le batterie completamente cariche, il gestore di bordo impone anche in questo caso la frenatura meccanica finché lo stato di carica non è sceso sotto l'85%, per evitare di danneggiare le batterie. In questo caso, non essendo l'EUDC un ciclo urbano, non si deve verificare l'autonomia di progetto, ma si vuole verificare come l'autonomia della vettura sia compresa tra i due estremi calcolati in precedenza.

Si riporta l'andamento del ciclo considerato, in termini di velocità del veicolo, per due cicli EUDC in serie, il rendimento della singola motoruota, e l'andamento della tensione del motore rispetto alla tensione massima disponibile, per mostrare come si sia dovuto diminuire la corrente I_d per rispettare il vincolo rappresentato dalla tensione massima di batteria (si veda § 4.6). Si riporta inoltre un grafico delle potenze nella fase di scarica, per mostrare come, con il dimensionamento effettuato nel Capitolo III, le batterie riescano a garantire i picchi di accelerazione richiesti, in puro elettrico.

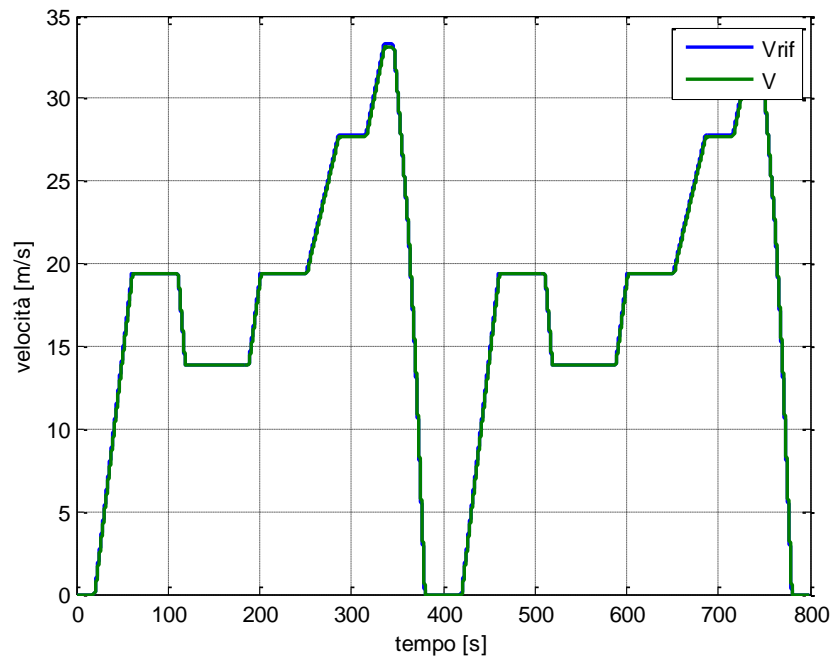


Figura 5.24 Profilo di velocità EUDC. In blu il riferimento, in verde il risultato numerico

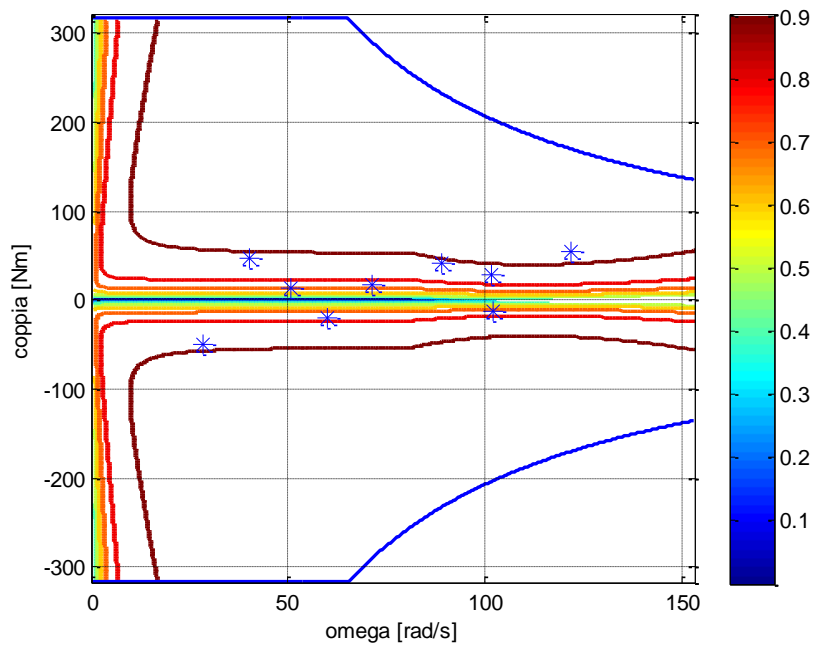


Figura 5.25: Rendimento della motoruota

Dalla Figura 5.24 si riscontrano le buone prestazioni del veicolo ibrido, mentre dalla Figura 5.25 si nota come il ciclo EUDC porti ad avere un buon rendimento elettrico nel campo di operatività del motore.

5.2.2 Verifica dell'autonomia in puro elettrico

Si riporta ora il grafico (Figura 5.28) dello stato di carica delle batterie, per due cicli EUDC in serie, distinguendo i casi di frenatura elettrica attivata e non.

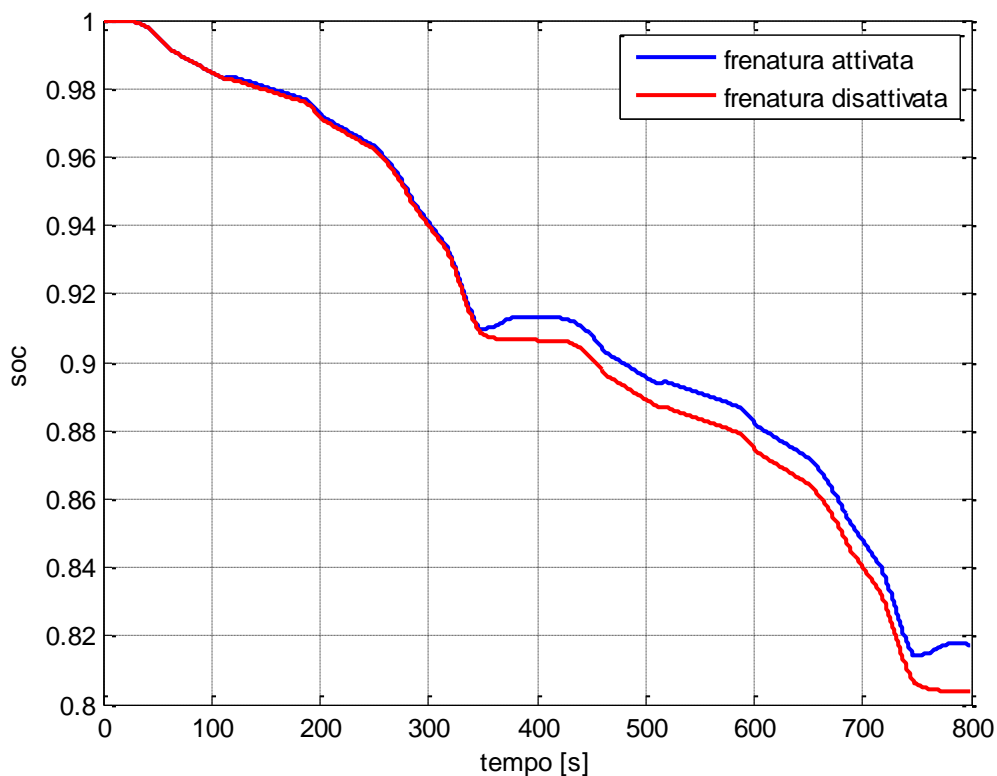


Figura 5.28 Diminuzione della carica negli accumulatori per due cicli EUDC in puro elettrico

Nel caso di frenatura elettrica disattivata si ha che, in due cicli, il SOC diminuisce del 18.25%, mentre, nel caso di frenatura elettrica attivata, la diminuzione si attesta al 19.61%. In Figura 5.29 si valuta l'energia spesa dalle batterie, nelle due condizioni limite:

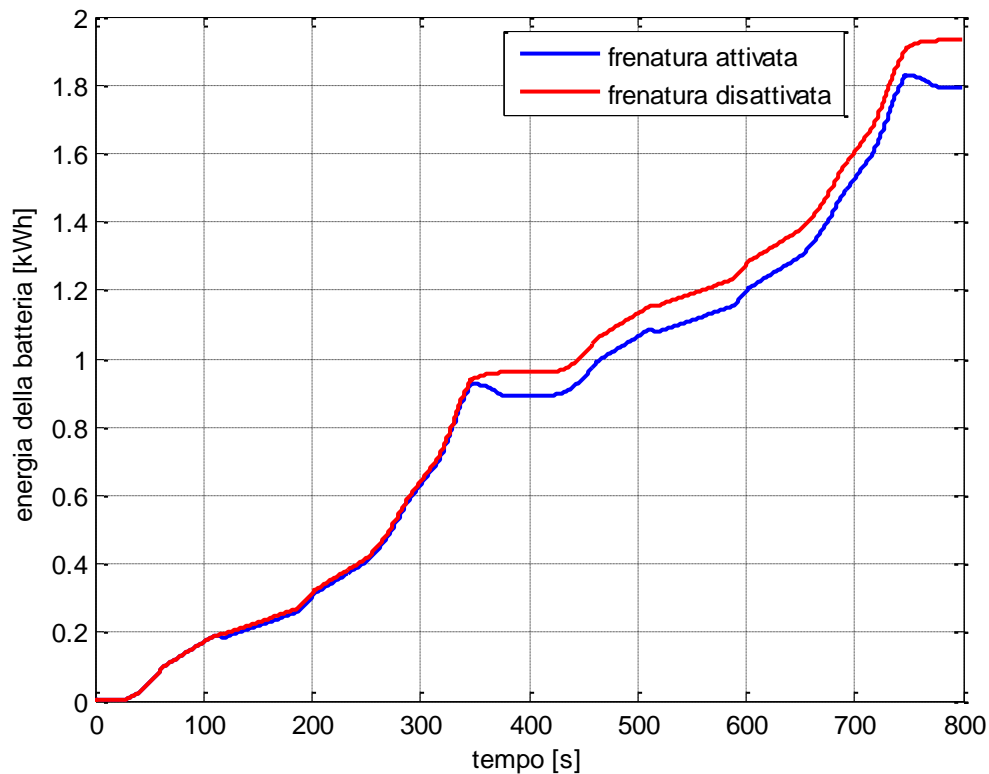


Figura 5.29 Cumulata dell'energia consumata in ciclo EUDC

Nel caso di frenatura elettrica attivata e non, su un percorso di circa 13.8 km, si ha un'energia spesa dalla batteria rispettivamente pari a 1.7946 kWh e 1.9303 kWh. Con questi dati si trovano i limiti dell'autonomia in puro elettrico per il ciclo normato EUDC, per una vettura ibrida serie con quattro motoruote indipendenti: nel caso migliore, con la frenatura elettrica sempre attiva, si ha un consumo specifico di $0.13 \frac{kWh}{km}$, mentre nel caso di frenatura elettrica sempre disattivata si ha un consumo specifico di $0.14 \frac{kWh}{km}$. Nel caso migliore, si determina quindi un'autonomia pari a

$$autonomia\ effettiva\ [km] = \frac{energia\ disponibile[kWh]}{consumo\ [\frac{kWh}{km}]} = \frac{10.064 \cdot 0.8\ kWh}{0.13 \frac{kWh}{km}} = 61.93\ km \quad (5.4),$$

mentre nel caso peggiore si arriverebbe a 57.5 km.

Si effettua ora la verifica dei limiti determinati, eseguendo un ciclo intero di scarica (il SOC passa dal 100 al 20%), con la frenata elettrica attivata sotto l'85% del SOC.

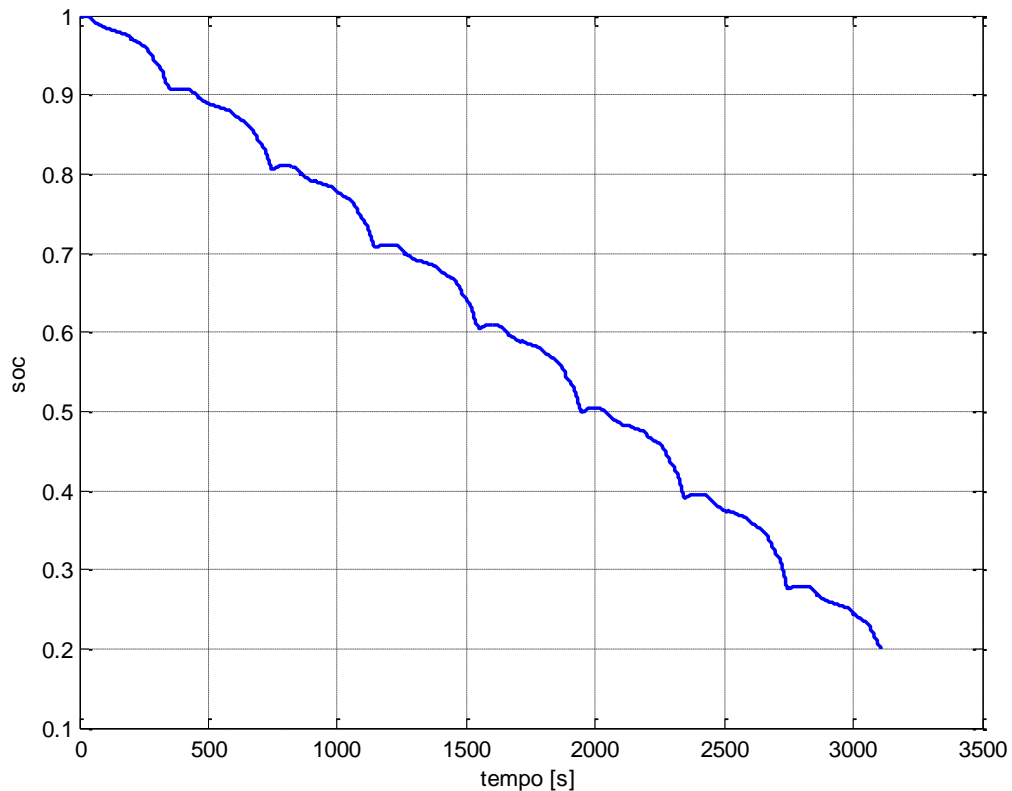


Figura 5.30 Andamento del SOC per un ciclo totale di scarica (freno elettrico attivo sotto l'85% del SOC)

Per un ciclo intero di scarica, si ha un consumo pari a circa $0.133 \frac{kWh}{km}$, per un'autonomia di circa 60.53 km. Si verifica quindi come questo dato sia compreso tra i due estremi calcolati in precedenza. Si può inoltre ragionevolmente supporre che, come per il ciclo ECE, il consumo effettivo sarà comunque maggiore, mantenendo la frenata elettrica attiva sotto l'85% del SOC, perché, per motivi di guidabilità e di comfort, spesso si affianca il freno meccanico a quello elettrico. Di seguito si riporta una tabella riassuntiva circa l'autonomia in puro elettrico per il veicolo ibrido serie con quattro motoruote indipendenti in esame, calcolata sul ciclo normato EUDC.

	Frenatura meccanica	Frenatura elettrica	Frenatura elettrica sotto l'85% del SOC
Consumo [$\frac{kWh}{km}$]	0.14	0.13	0.133
Autonomia [km]	57.5	61.93	60.53

Tabella 5.4 Riassunto delle valutazioni circa l'autonomia, per il ciclo EUDC

Per quanto riguarda la logica PFCS, come ci si aspettava, le batterie non si scaricano completamente, ma lo stato di carica delle batterie si stabilizza attorno al valore di 0.55.

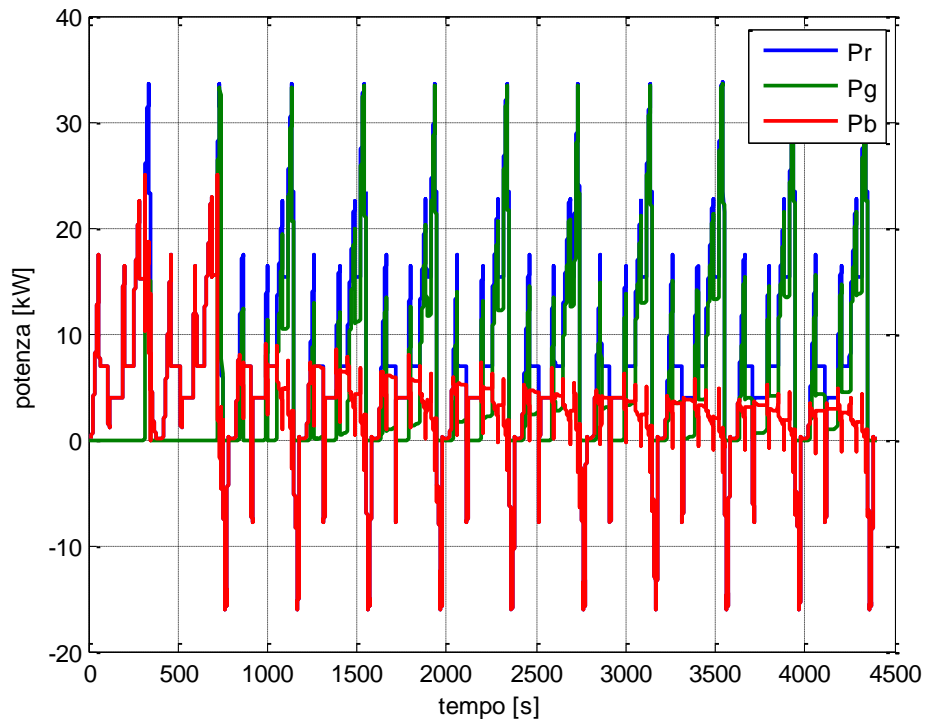


Figura 5.31 Andamento delle potenze per la logica PFCS (blu-richiesta, verde-generatore, rosso-batterie), con un SOC iniziale pari a 1

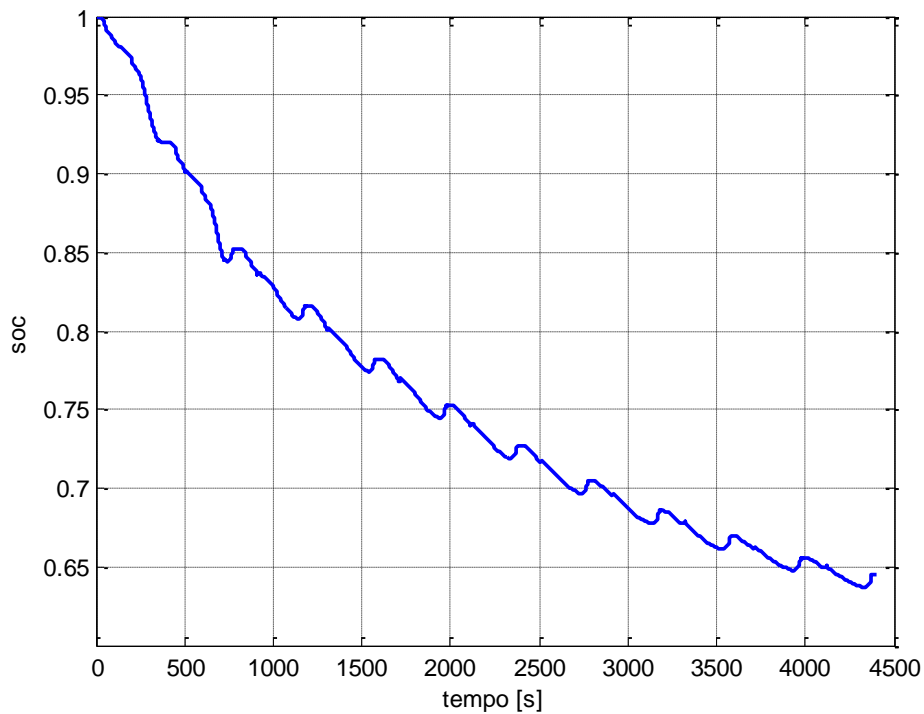


Figura 5.32 Andamento del SOC con la logica PFCS

Dalla figura 5.31 si nota come la propulsione primaria intervenga a coprire una parte della richiesta, in accordo con le equazioni (4.54) e (4.55); la parte rimanente viene coperta dalle batterie, che quindi si scaricano. All'avvicinarsi del SOC al valore di 0.55, la potenza fornita dalle batterie (traccia rossa) tende a diminuire, perché la potenza richiesta (traccia blu) viene coperta in misura sempre maggiore dalla potenza garantita dalla propulsione primaria (traccia verde). Al limite il SOC arriverà al valore 0.55, e la potenza richiesta sarà coperta integralmente da quella del moto-generatore.

5.2.3 Valutazione della ricarica a bordo

Si vogliono ora valutare le principali grandezze elettro-meccaniche della vettura in esame, nella fase di ricarica delle batterie, utilizzando le due logiche implementate per questo modello, con gli stessi valori di SOC_U e SOC_L del ciclo ECE. Come per il ciclo ECE, si vuole principalmente valutare il tempo di ricarica ed il consumo di carburante, oltre alle grandezze elettro-meccaniche della vettura, e non si distingue tra condizione di frenatura elettrica attivata o disattivata. Si riportano di seguito i grafici della potenza richiesta (P_r -blu), potenza espressa dal generatore (P_g -verde), e delle batterie (P_b -rosso) per la logica TCS. Si nota come, dopo una breve fase di scarica, nella quale la propulsione è garantita dalle batterie, si avvia la ricarica.

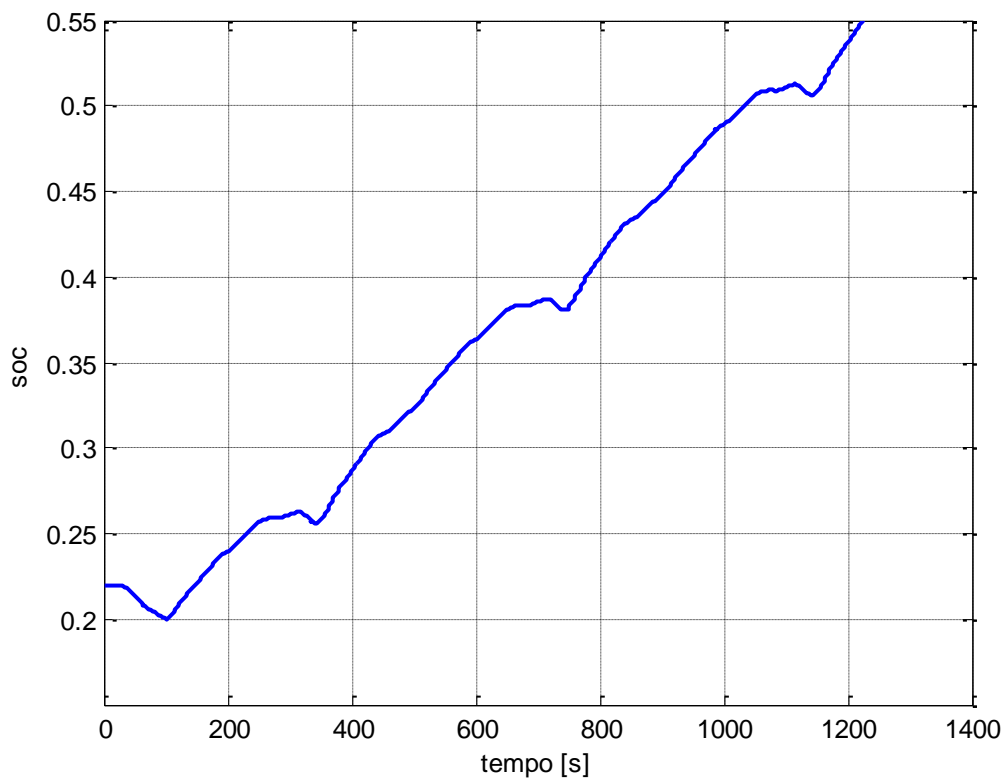


Figura 5.33 Andamento del SOC per la logica TCS

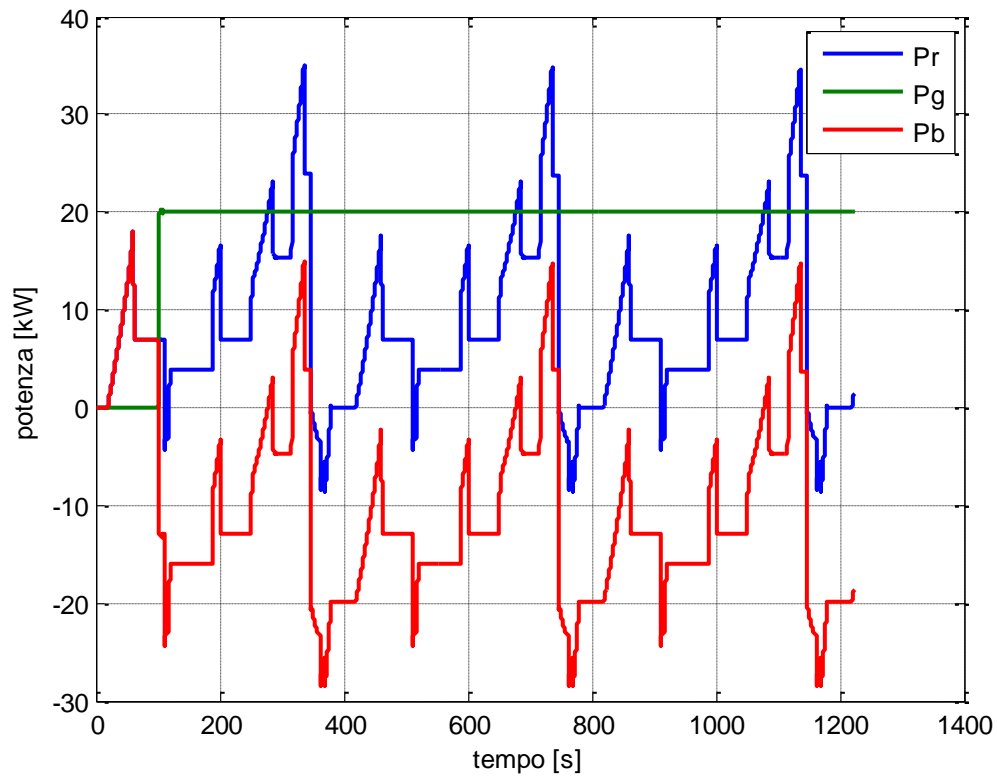


Figura 5.34 Andamento delle potenze per la logica TCS

Dalla figura 5.34 si nota come la logica TCS faccia lavorare il motore endotermico a potenza costante (in condizioni di regime), indipendentemente dai valori assunti dalla potenza richiesta per l'avanzamento. La differenza tra la potenza fornita dal generatore e quella richiesta dal moto corrisponde alla potenza che fluisce verso le batterie. I picchi di potenza che non sono garantiti dal moto-generatore vengono infatti coperti dalle batterie (Figura 5.35). Lo stesso andamento della potenza si ritrova in Figura 5.36, per la corrente di ricarica.

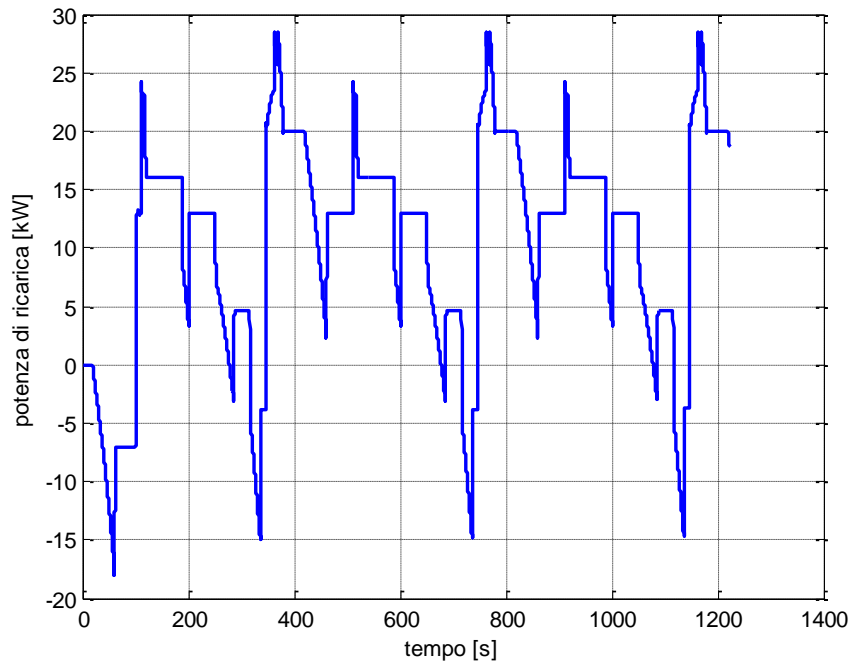


Figura 5.35 Potenza di ricarica per la logica TCS

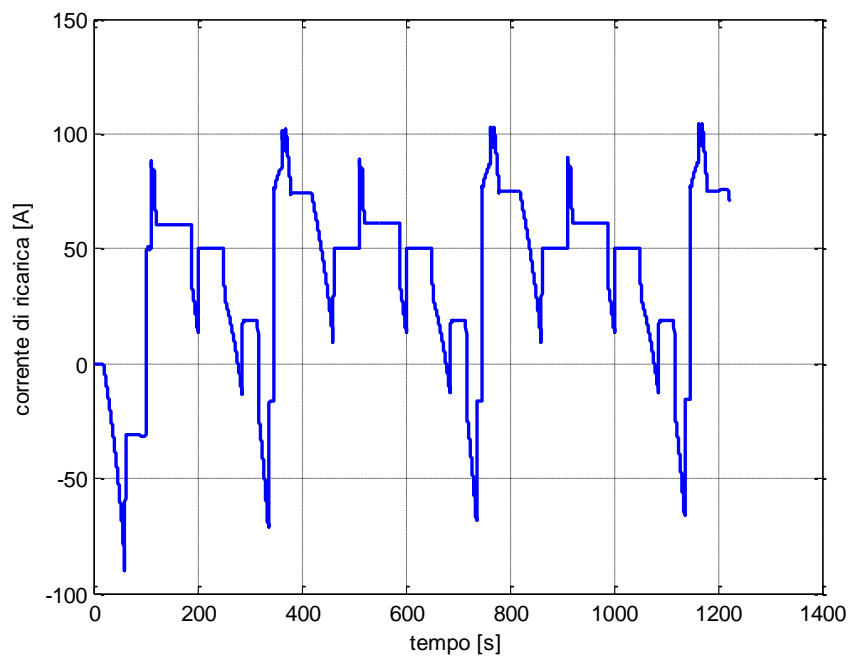


Figura 5.36 Corrente di ricarica per la logica TCS

La Figura 5.36 permette di verificare quale sia la massima corrente di ricarica. Come per il ciclo ECE, la potenza netta generata dalla propulsione primaria è di 20 kW, porta a raggiungere il limite di 80 A, corrente massima che le batterie possono ricevere in ingresso. Si riporta di seguito il punto di funzionamento del motore endotermico che, in questa logica, è unico.

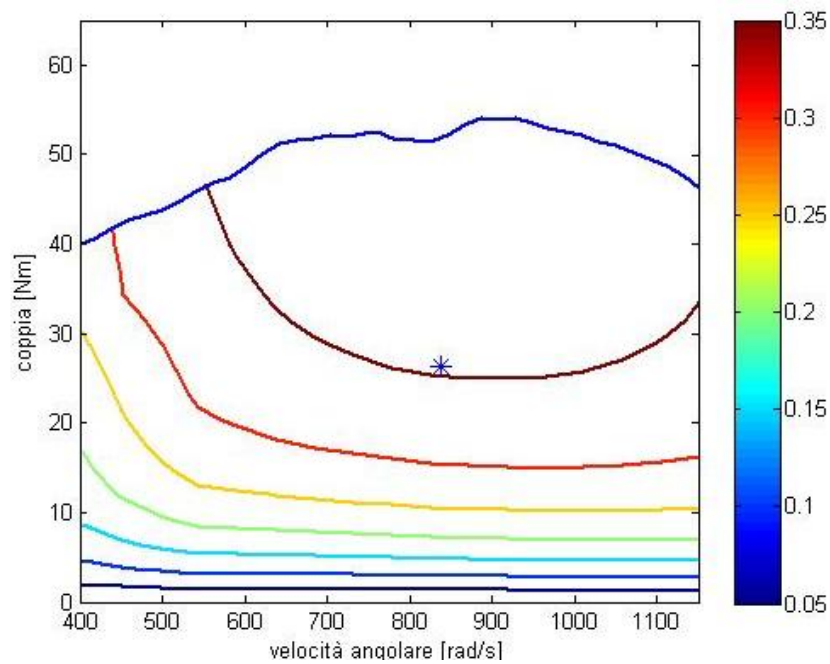


Figura 5.37 Diagramma di rendimento del motore CI e punto di lavoro nella logica TCS

Si riporta di seguito il grafico del flusso di carburante che, integrato nel tempo, determina il consumo di carburante necessario per la fase di ricarica, con la logica TCS.

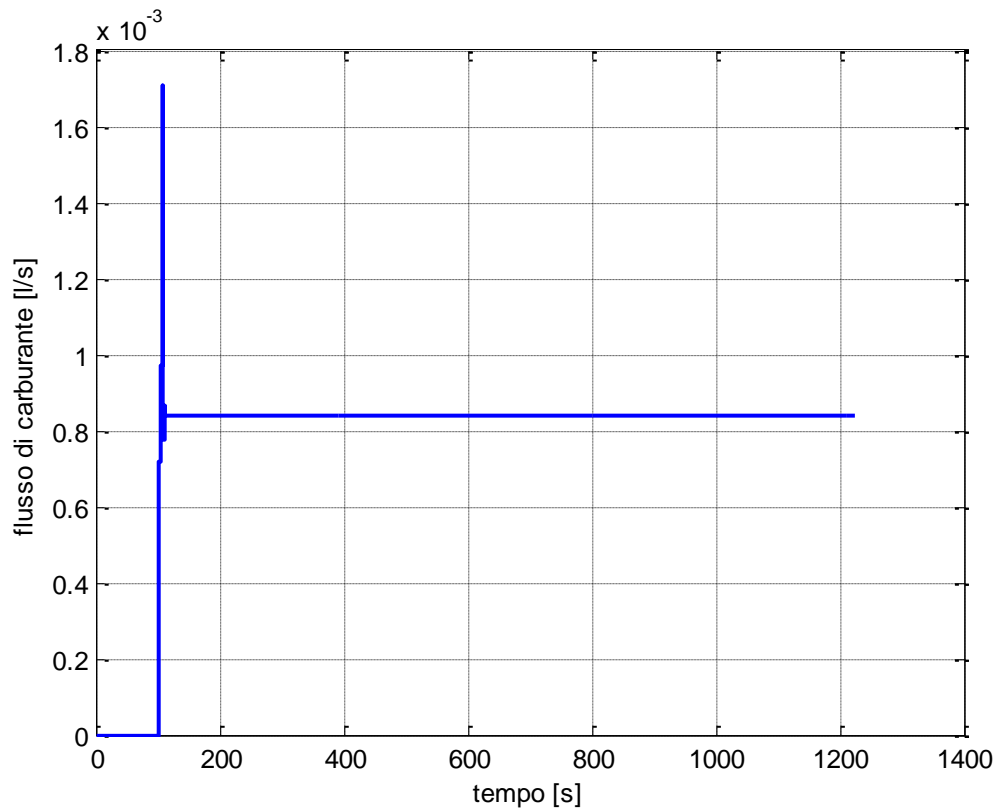


Figura 5.38 Flusso di carburante

Come si nota dalla Figura 5.38, dopo un transitorio legato alla fase dell'accensione del motore, il flusso si stabilizza ad un valore costante, poiché sia la velocità angolare che la coppia del motore endotermico sono costanti.

Valgono, per la logica TCS, le considerazioni effettuate in precedenza sul ciclo ECE nell'analogia prova. Dalla figura 5.33 si nota inoltre come la ricarica venga effettuata in circa 1120 secondi, con un consumo di 0.9404 l su un percorso di circa 19.5 km, per un consumo di $4.83 \frac{l}{100 km}$.

Si riportano di seguito i grafici relativi ad una fase di carica con la logica PFCS.

La Figura 5.39 permette di osservare come la fase di ricarica faccia tendere il SOC al valore di 0.55, coerentemente con le equazioni che esprimono la potenza del generatore, nella logica PFCS (cfr § 4.8).

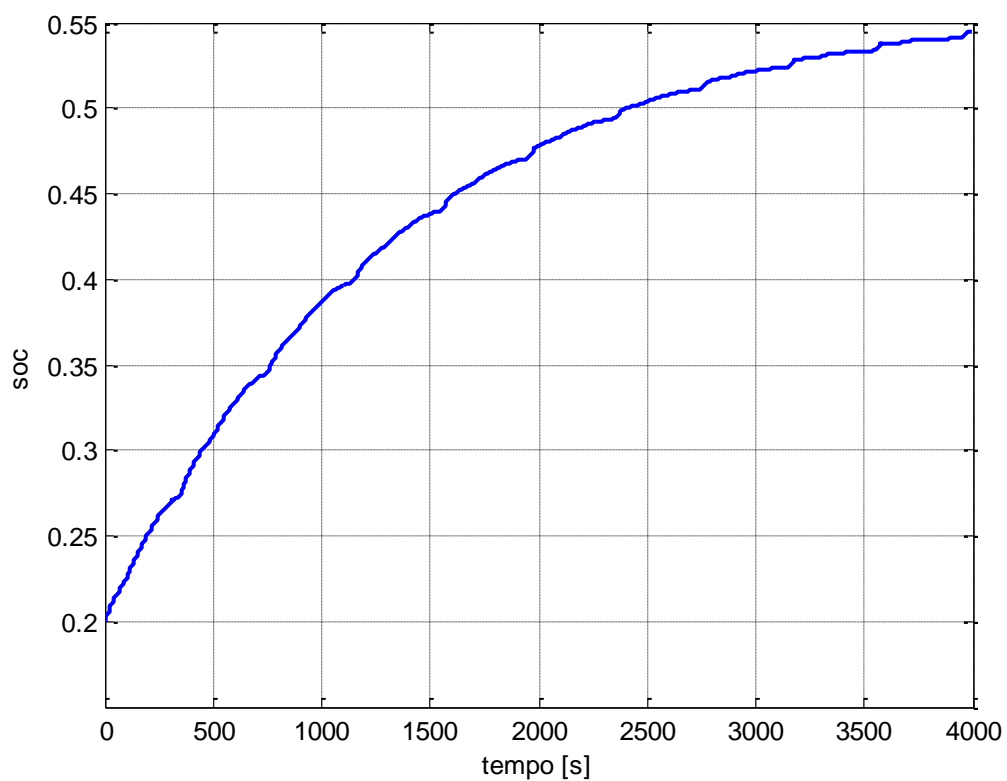


Figura 5.39 Andamento del SOC per la logica PFCS

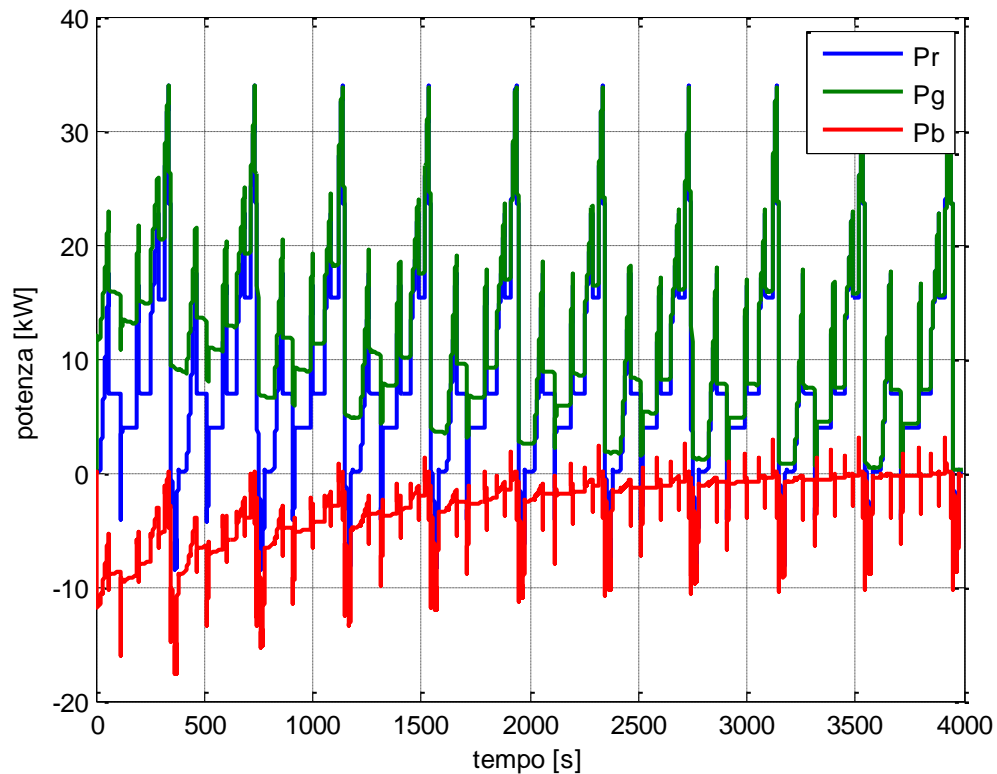


Figura 5.40 Andamento delle potenze per la logica PFCS

Le figure 5.40-41 confermano come la logica PFCS tenda a ridurre la potenza di batteria, diminuendo quindi di conseguenza le perdite di carica e scarica, oltre ad estenderne il ciclo di vita. La potenza del moto-generatore segue la richiesta, e questo, per il ciclo EUDC, porta il moto-generatore a lavorare con potenze e coppie maggiori rispetto a quelle necessarie per il ciclo ECE (si veda la Figura 5.43). Anche in questo caso, all'avvicinarsi del livello di riferimento del SOC, che è pari al suo valor medio, 0.55 (si veda il paragrafo 4.8), la potenza garantita dal moto-generatore tende a coincidere con quella richiesta.

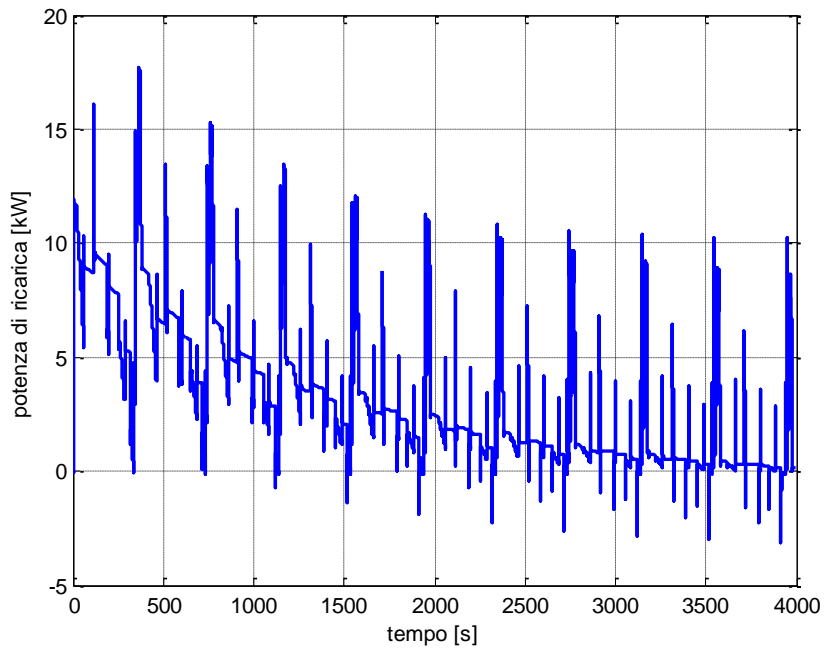


Figura 5.41 Potenza di ricarica per la logica PFCS

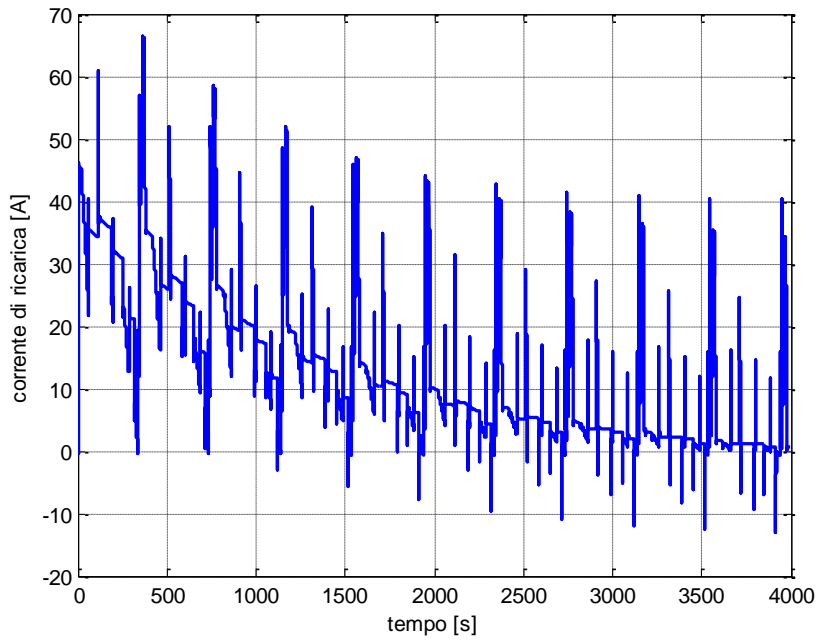


Figura 5.42 Corrente di ricarica per la logica PFCS

In questa logica la propulsione primaria segue la richiesta, allargando di conseguenza il suo campo di utilizzo (si veda la mappa di Figura 5.43).

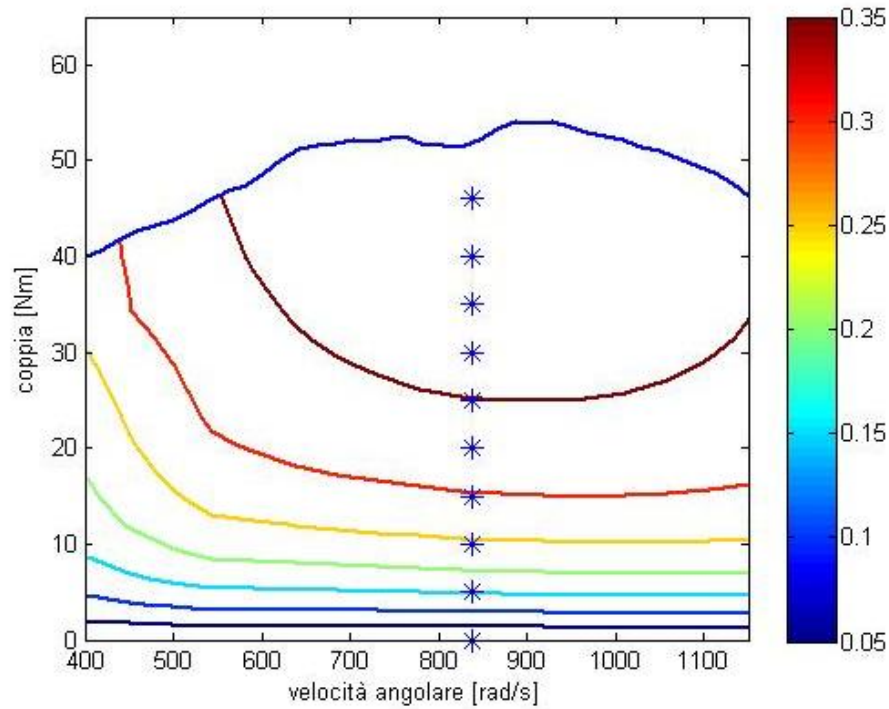


Figura 5.43 Diagramma di rendimento del motore CI e punti di lavoro nella logica PFCS

Dalla Figura 5.44, si osserva come, dopo una perturbazione iniziale legata al transitorio di accensione, il flusso di carburante si attesti su valori in questo caso più alti di quelli della logica TCS, per seguire la richiesta, che in questo caso arriva ad avere dei picchi di circa 34 kW.

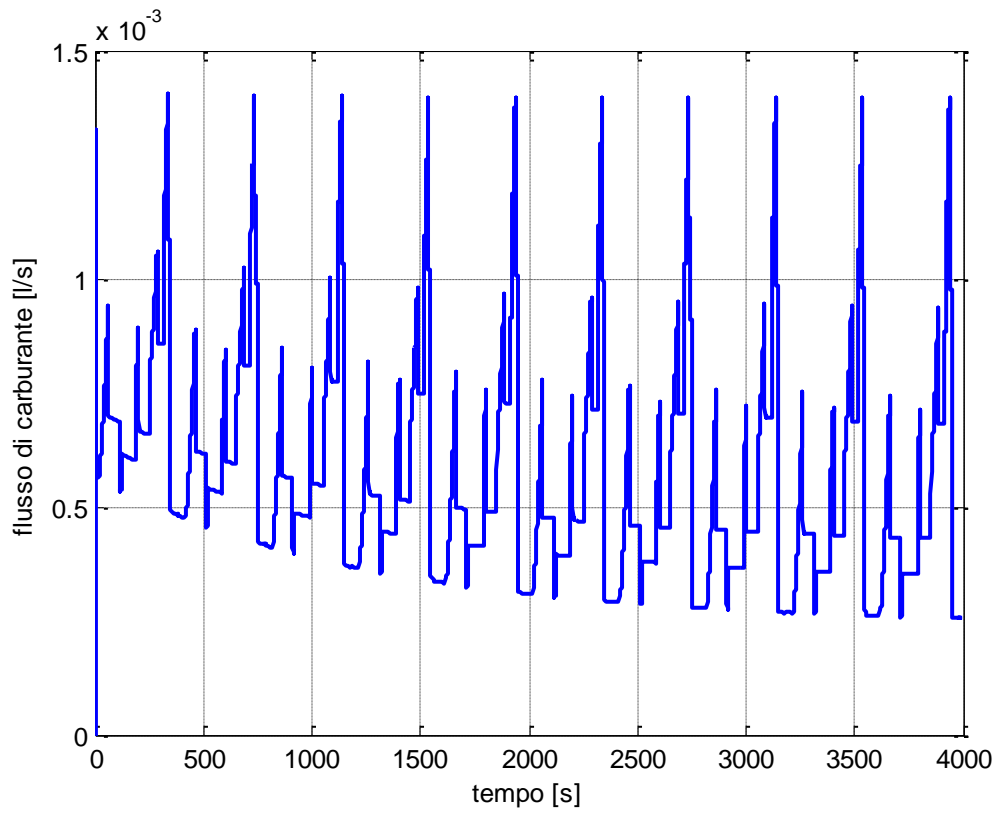


Figura 5.44 Flusso di carburante

Dalla figura 5.39 si nota inoltre come la ricarica venga effettuata in circa 4000 secondi, con un consumo di 2.2494 l su un percorso di circa 69 km, per un consumo di $3.26 \frac{l}{100 km}$.

Di seguito si riporta una tabella comparativa dei risultati ottenuti con le due logiche, considerando che il serbatoio montato a bordo ha una capienza di 35 l.

Strategia di controllo	TCS	PFCS
Potenza media di ricarica [kW]	14	9
SOC iniziale %	20	20
SOC finale %	55	55
Tempo per arrivare al SOC finale [s]	1120	4000
Consumo di carburante [l/100 km]	4.83	3.26
% rispetto alla logica TCS	-	-31.5%
Autonomia prevista [km]	724.6	1073.6

Tabella 5.5 Riassunto delle valutazioni circa la ricarica a bordo, per il ciclo EUDC

Si nota come valgano le considerazioni fatte per il ciclo ECE. Di seguito si riporta una tabella comparativa tra i due cicli.

Strategia di controllo	ECE-TCS	ECE-PFCS	EUDC-TCS	EUDC-PFCS
Potenza media di ricarica [kW]	12.5	7.5	14	9
SOC iniziale %	20	20	20	20
SOC finale %	55	55	55	55
Tempo per arrivare al SOC finale [s]	737	3700	1120	4000
Consumo di carburante [l/100 km]	16.8	7.53	4.83	3.26
% rispetto alla logica TCS	-	-55.2%	-	-31.5%
Autonomia prevista [km]	208.3	464.8	724.6	1073.6

Tabella 5.6 Tabella comparativa delle prestazioni per un ciclo di ricarica- cicli ECE ed EUDC

Si riporta una tabella comparativa delle prestazioni delle vetture ibrida e di serie, per il ciclo EUDC.

Consumo	Panda 1100 di serie	Panda ibrida con motoruote-TCS	Panda ibrida con motoruote-PFCS
Consumo equivalente [l/100 km]	5.7	2.2	2.23

Tabella 5.7 Confronto tra la vettura di serie e quella innovativa per il ciclo EUDC

Si nota come, rispetto al ciclo ECE, il ciclo misto EUDC penalizzi meno la logica PFCS, poiché in questo caso la richiesta di potenza si attesta su livelli maggiori, e quindi la logica PFCS, che segue la richiesta, si trova a lavorare in zone a rendimento maggiore. La logica TCS in questo caso porta il moto-generatore a non garantire tutti i picchi di potenza richiesta, che sono invece coperti dalle batterie. Si noti inoltre come, per la logica TCS, il consumo equivalente aumenti leggermente rispetto al ciclo ECE soprattutto perché, a parità di ΔSOC nella fase di scarica delle batterie (0.9-0.2), il consumo di energia elettrica è maggiore per il ciclo EUDC, e quindi in questo caso si percorrono meno chilometri in puro elettrico.

5.3 Ciclo reale

Si riportano ora alcune simulazioni effettuate su un ciclo reale, per verificare che l'autonomia ed il consumo in puro elettrico, calcolati con riferimento al ciclo ECE, siano compatibili con i risultati trovati analizzando questo ciclo urbano reale.

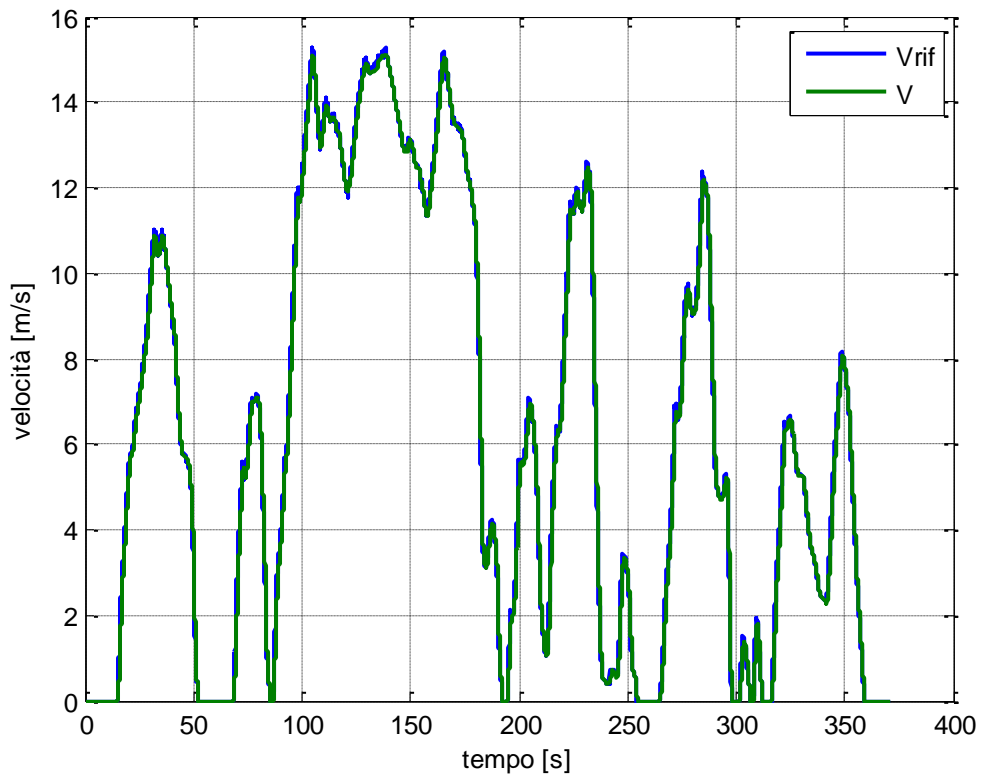


Figura 5.45 Profilo di velocità per il ciclo reale considerato

Si eseguono due cicli di scarica, uno con la frenatura elettrica sempre attiva ed uno con il freno meccanico sempre attivo. In Figura 5.46 si riporta l'andamento del SOC, nei due casi estremi considerati.

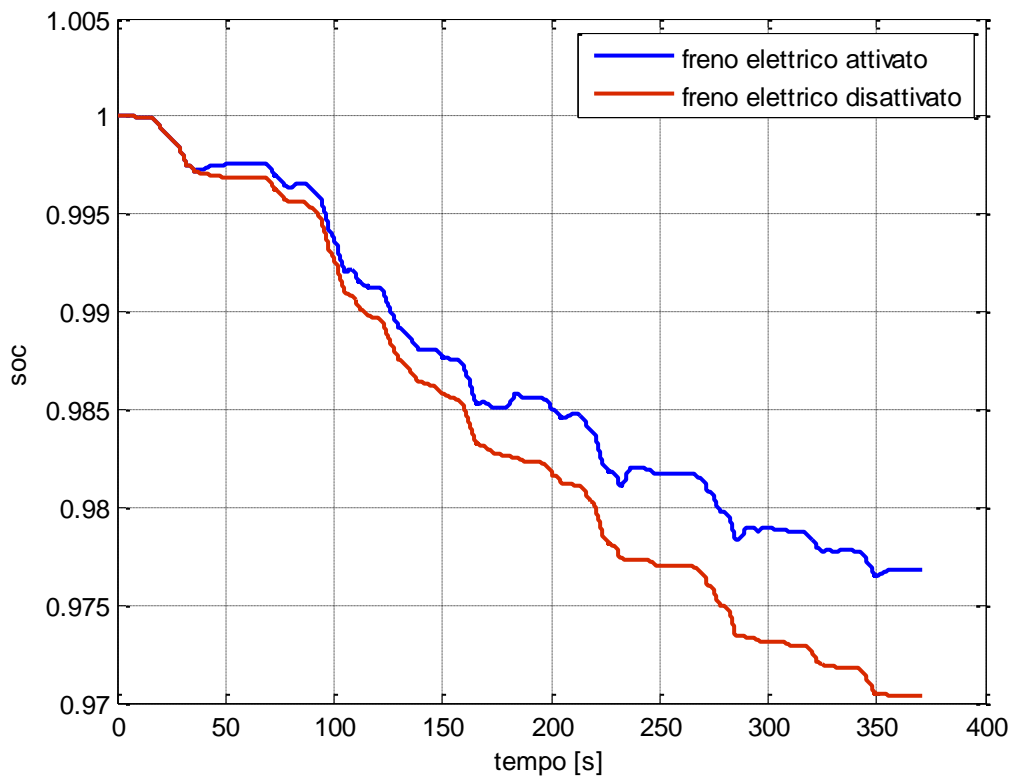


Figura 5.46 Andamento del SOC con e senza freno elettrico

Si nota come in questo ciclo siano molto rilevanti le frenate. In particolare, con il freno elettrico sempre disattivato, si arriva ad avere un consumo di 0.143 kWh/km, mentre con il freno elettrico sempre attivato si consumano 0.112 kWh/km. Effettuando un ciclo completo di scarica con il freno elettrico attivato sotto l'85% del SOC, si ottiene un consumo medio di 0.1174 kWh/km. Tenendo in considerazione che un ciclo reale è sempre leggermente più oneroso rispetto ad un ciclo normato, e che il valore del consumo effettivo sarà maggiore di 0.1174 kWh/km poiché spesso affianca il freno meccanico a quello elettrico, si può dire come siano stati verificati i risultati ottenuti sul ciclo normato ECE.

Si riporta ora una tabella riassuntiva circa il ciclo reale, e poi un confronto tra i risultati ottenuti per il ciclo ECE e quello reale.

	Frenatura meccanica	Frenatura elettrica	Frenatura elettrica sotto l'85% del SOC
Consumo $[\frac{kWh}{km}]$	0.143	0.112	0.1174
Autonomia [km]	56.3	72	68.6
% rispetto all'autonomia di progetto	+11.9	+43	+36.3

Tabella 5.8 Riassunto delle valutazioni circa l'autonomia, per il ciclo reale.

	Frenatura elettrica sotto l'85% del SOC-ECE	Frenatura elettrica sotto l'85% del SOC-reale
Consumo $[\frac{kWh}{km}]$	0.1	0.1174
Autonomia [km]	80	68.6
% rispetto all'autonomia di progetto	+60	+36.3

Tabella 5.9 Riassunto delle valutazioni circa l'autonomia, per il ciclo ECE e per il ciclo reale

Si eseguono ora le prove di carica della batteria, seguendo lo stesso procedimento adottato per i cicli ECE ed EUDC, e si calcola poi il consumo equivalente. Si riportano i risultati rispettivamente nelle Tabelle 5.10 e 5.11.

Strategia di controllo	ECE-TCS	ECE-PFCS	reale-TCS	reale-PFCS
Potenza media di ricarica [kW]	12.5	7.5	17	12
SOC iniziale %	20	20	20	20
SOC finale %	55	55	55	55
Tempo per arrivare al SOC finale [s]	737	3700	767	3570
Consumo di carburante [l/100 km]	16.8	7.53	13.74	6.59
% rispetto alla logica TCS	-	-55.2	-	-52
Autonomia prevista [km]	208.3	464.8	254.7	531

Tabella 5.10 Tabella comparativa delle prestazioni per un ciclo di ricarica- cicli ECE e reale

Si riporta una tabella comparativa delle prestazioni delle vetture ibrida e di serie, per il ciclo reale.

Consumo	Panda 1100 di serie	Panda ibrida con motoruote-TCS	Panda ibrida con motoruote-PFCS
Consumo equivalente [l/100 km]	7.2	2.11	5.33

Tabella 5.11 Confronto tra la vettura di serie e quella innovativa per il ciclo reale

Per quanto riguarda la fase di ricarica delle batterie, confrontando il ciclo reale e quello normato (ECE), si nota come le considerazioni descritte in precedenza per il ciclo ECE (e per l'EUDC) siano valide anche in questa occasione, tenendo conto che il ciclo reale è mediamente (leggermente) più oneroso rispetto a quello normato, a parità di ambito (in questo caso cittadino). Per quanto riguarda il paragone con la vettura di serie, si ha che il ciclo reale ha un consumo equivalente minore rispetto alla Panda 1.1. Rispetto al ciclo normato ECE invece, per la logica TCS, a parità di ΔSOC per la parte in puro elettrico

(0.9-0.2), il ciclo reale ha un consumo maggiore e quindi percorre meno strada in puro elettrico. Questo porta il ciclo reale ad avere un consumo equivalente, per la logica TCS, leggermente maggiore rispetto al ciclo ECE. Il consumo equivalente del ciclo reale per la logica PFCS è invece leggermente migliore, rispetto a quello del ciclo normato ECE. Questo perché il ciclo reale è in media leggermente più oneroso dell'ECE, e quindi porta il motore endotermico, quando segue la potenza richiesta alle ruote, come accade nella logica PFCS, a lavorare in zone di efficienza leggermente maggiori rispetto al ciclo ECE.

Conclusioni

La necessità di ridurre le emissioni nocive da parte dei veicoli alimentati da combustibili fossili e lo sfruttamento delle materie prime legate al petrolio, ha portato la comunità scientifica ed il mondo delle imprese automobilistiche a realizzare veicoli elettrici ed ibridi. Se da un lato la diffusione dei veicoli elettrici è limitata ad usi prevalentemente cittadini, a causa dell'autonomia ad oggi ridotta e dei costi ancora elevati, i veicoli ibridi rappresentano una soluzione che unisce al suo interno un sensibile incremento dell'efficienza dello sfruttamento delle fonti energetiche ed una marcata riduzione delle emissioni di agenti inquinanti e responsabili dell'effetto serra. In questo contesto si inserisce questo lavoro di tesi: lo sviluppo di una vettura ibrida di tipo serie, con una propulsione innovativa rappresentata da quattro motoruote, unisce al suo interno i vantaggi tipici di un ibrido serie con quelli strettamente legati alla configurazione innovativa adottata. In particolare, con questa specifica configurazione, a fronte di un piccolo incremento del peso complessivo del veicolo, si ha un notevole miglioramento del rendimento energetico della vettura stessa, ed un aumento della sicurezza di guida, in quanto ogni motoruota è indipendente, e può essere controllata singolarmente. In questa trattazione ci si è occupati del primo dimensionamento dei componenti del *power train* della vettura ibrida serie con quattro motoruote, a partire dalle prestazioni della vettura di serie, e della sua modellizzazione con il software MatLab Simulink®. Il modello è stato poi utilizzato per valutare due tra le più comuni strategie di controllo per una vettura ibrida serie, e per valutare i consumi della vettura in esame.

La prima parte di questo lavoro di tesi è stata dedicata all'analisi dello stato dell'arte degli organi deputati alla trazione del veicolo. Dopo aver descritto brevemente i veicoli elettrici ed ibridi, si è riportata una panoramica delle batterie più comuni presenti sul mercato,

riportandone le caratteristiche principali. Si è visto come le tecnologie attualmente utilizzabili per i veicoli siano soprattutto le batterie al litio, ed in aggiunta le Zebra e le NiMH. Gli accumulatori adottati per questo veicolo sono quelli ai polimeri di litio, che rendono disponibile una grande energia specifica. Nel dimensionamento del corpo vettura è infatti fondamentale ridurre al minimo le aggiunte di peso rispetto alla configurazione originale dell'automezzo.

Si sono poi analizzate schematicamente le varie possibilità, in termini di propulsione elettrica: in particolare, risulta che per questa applicazione il motore brushless è quello più indicato, grazie agli alti valori di rendimento e di coppia per unità di massa (e di volume) che esso può raggiungere [30]. Vengono descritti in seguito le modalità, tipiche delle vetture ibride in configurazione serie, di accoppiare un motore endotermico ad un generatore. Dopo aver spiegato la dinamica di funzionamento di una soluzione alternativa per la propulsione primaria, un motore Stirling *free piston*, l'ultimo punto affrontato nello stato dell'arte è stato una veloce panoramica delle logiche presenti sul mercato che ottimizzano i flussi di energia.

La fase successiva è quella del primo dimensionamento degli organi di propulsione della vettura con quattro motoruote indipendenti: si è proceduto innanzitutto al dimensionamento del pacco batterie presente a bordo. Questo è stato effettuato, dal punto di vista energetico, in modo assolutamente cautelativo, per poter avere anche le piene prestazioni in puro elettrico, in termini di potenza garantita in fase di accelerazione. Per la propulsione primaria, tra le varie possibilità, è stato scelto un motore motociclistico che, opportunamente rimappato, trascina il generatore elettrico garantendo le prestazioni della macchina di serie, con un rendimento in linea con i valori massimi raggiungibili dai motori motociclistici attualmente presenti sul mercato. Da notare che questo modello è *Object Oriented*, pertanto, nel caso si decidesse di sostituire il motore motociclistico adottato, gli altri organi deputati alla trazione manterrebbero le loro funzioni e caratteristiche. Si è quindi dimensionato il generatore elettrico, che è direttamente connesso al motore endotermico, e le singole motoruote, definendo le grandezze elettromeccaniche (coppie e potenze) che esse devono garantire.

La seconda parte di questo lavoro è rappresentata dalla riconfigurazione di un modello esistente in MatLab Simulink® per la vettura in esame; in particolare, è stato riadattato il modello di una vettura ibrida di tipo parallelo. Si è quindi semplificata la parte relativa alle trasmissioni meccaniche, è stato introdotto il generatore, e si è sviluppato un anello di controllo per la velocità angolare del motore endotermico. Quest'ultimo, infatti, nelle vetture ibride di tipo serie, è direttamente connesso al generatore, ed i due organi ruotano alla stessa velocità angolare. E' stato poi modificato il blocco relativo al singolo motore elettrico, ridefinendone uno per le quattro motoruote. Sono state infine implementate due tra le più comuni strategie di controllo per una vettura ibrida di tipo serie (la *Thermostat Control Strategy-TCS* e la *Power Follower Control Strategy-PFCS*, [31]). In questo modello, il controllo dell'energetica di bordo definisce quale potenza debba essere garantita dal blocco moto-generatore. A partire dalla potenza espressa dalla propulsione primaria, si definisce la corrente da essa garantita. Nel modello è presente un nodo di conguaglio, nel quale si effettua un bilancio delle correnti presenti nel modello. In particolare, la differenza tra la corrente richiesta dalle quattro motoruote e quella fornita dalla propulsione primaria, rappresenta direttamente la corrente di batteria. Se la differenza definita in precedenza è positiva, le batterie contribuiscono a garantire la potenza richiesta, mentre se essa è negativa (ad esempio durante una frenata), le batterie vengono ricaricate.

Si descrivono ora sinteticamente i risultati ottenuti nelle simulazioni del comportamento della vettura ibrida serie con quattro motoruote indipendenti in esame:

- in un ciclo urbano normato (ECE) si ottiene un'autonomia in puro elettrico di circa 80 km, pari al 60% in più rispetto al valore di progetto (50 km); per un ciclo reale l'autonomia garantita è di circa 68.6 km, con una maggiorazione del 36% rispetto al dato di progetto. Questi dati testimoniano come il dimensionamento delle batterie sia stato effettuato in modo assolutamente cautelativo, dal punto di vista energetico. Poiché però questo dimensionamento è servito anche per avere un picco rilevante di potenza in puro elettrico in fase di accelerazione, si è deciso di mantenere questo pacco batterie;

- nella fase di ricarica delle batterie sono state valutate le due logiche di gestione dell'energetica on board; la strategia TCS porta a una ricarica delle batterie in tempi contenuti, in quanto fornisce continuamente una potenza di gran lunga superiore a quella necessaria per il solo avanzamento, mentre la PFCS insegue il valore di riferimento dello stato di carica, impiegando un tempo maggiore per raggiungerlo. In definitiva, la logica TCS ottimizza l'efficienza del solo motore endotermico, a scapito però delle grandezze elettriche, che subiscono forti variazioni che ne limitano il ciclo di vita, mentre la logica PFCS fornisce sempre un valore di riferimento del SOC (stato di carica delle batterie) ed una condizione di sostanziale stabilità per le grandezze elettriche, e questo porta ad un aumento della durata dei componenti elettrici e delle batterie.
- I consumi equivalenti, calcolati sui cicli ECE, EUDC e reale dimostrano come la vettura innovativa abbia, con entrambe le logiche di controllo implementate, delle prestazioni migliori rispetto alla vettura di serie. Analizzando le differenze presenti tra le due logiche per il ciclo ECE, si nota come il consumo equivalente sia minore per la TCS, che lavora sempre nel punto di massimo rendimento per il motore endotermico, ed ha una grande percorrenza in puro elettrico, anche grazie alla frenata rigenerativa. La PFCS segue invece la richiesta di potenza proveniente dalle ruote; per un ciclo urbano come è l'ECE, il motore endotermico si trova a lavorare in punti con rendimenti molto bassi, e questo penalizza la logica PFCS rispetto alla TCS. Per cicli più onerosi dell'ECE, dal punto di vista della potenza richiesta per l'avanzamento, come sono il ciclo reale e l'EUDC, la PFCS fa lavorare il motore endotermico in punti a rendimento maggiore rispetto all'ECE, e quindi diminuiscono i consumi equivalenti. Per quanto riguarda la logica TCS, il ciclo reale e l'EUDC portano a consumi maggiori, per il puro elettrico, e quindi il consumo equivalente è superiore, rispetto al ciclo ECE. In definitiva, per come è stato dimensionato il motore endotermico, la logica PFCS è ragionevole solo se si effettuano percorrenze extra-urbane, che portano ad avere potenze richieste maggiori, e quindi il motore endotermico può lavorare in zone di buon rendimento.

Al contrario, la logica TCS ottimizza sempre il motore endotermico, per cui ha sempre consumi equivalenti limitati.

Gli ambiti di miglioramento e approfondimento che vengono aperti da questo lavoro di tesi sono molteplici. Innanzitutto si potrebbe affinare il livello di dettaglio per i modelli delle singole componenti, ponendo particolare attenzione ai due azionamenti elettrici: un modello che strutturi in maniera più precisa le potenzialità del generatore elettrico e le prestazioni di un suo eventuale sistema di pilotaggio dedicato, potrebbe conferire doti di elasticità di funzionamento interessanti sotto il profilo delle emissioni e dei consumi.

E' emerso che le batterie sono sovradimensionate, dal punto di vista energetico. Sarebbe opportuno valutare un eventuale ridimensionamento del pacco batterie, con conseguente diminuzione del costo e del peso della vettura, a patto di accettare una diminuzione delle prestazioni in fase di accelerazione, per il puro elettrico.

In questo lavoro di tesi ci si preponeva di eseguire un primo dimensionamento degli organi deputati alla trazione e la realizzazione di un modello congruente con la vettura in esame, per valutarne le prestazioni, con una bozza di strategie di controllo. In bibliografia [31] sono disponibili studi specifici sulle strategie di controllo dell'energetica on board, di cui sarebbe interessante implementare modelli numerici sulla citycar, e quindi testarne ulteriormente le prestazioni.

A partire poi dai risultati ottenuti in questa tesi, si potrebbe pensare a variazioni delle componenti che sono state inserite a bordo. Come si è accennato nel paragrafo 2.3.3, esistono soluzioni innovative nell'ambito ICE che sembrerebbero avere buoni margini di applicazione nel campo dei veicoli ibridi elettrici.

È opportuno inoltre valutare la possibilità di disattivare la trazione integrale, facendo muovere il veicolo con la spinta di due sole ruote; questa configurazione potrebbe ridurre ulteriormente le perdite negli azionamenti elettrici.

Analizzando i consumi equivalenti calcolati nel capitolo V, si vede che la vettura innovativa ha delle ottime prestazioni, soprattutto paragonandola alla vettura di serie. E' necessario però, dopo aver verificato le prestazioni reali della vettura, effettuare una valutazione economica riguardo al dimensionamento proposto in questa tesi (Capitolo III).

Si deve infine tenere in considerazione che la modifica di una vettura già in commercio rappresenta un vincolo per le sue prestazioni. Ad esempio, già nei modelli attualmente in commercio di veicoli ibridi elettrici, come i modelli Toyota e Honda, è evidente quale sia l'importanza di una corretta analisi della componente aerodinamica. Studi specifici su questi aspetti sono auspicabili per una futura diffusione su larga scala di quella che sembra oggi la più concreta soluzione per la riduzione delle emissioni.

Ringraziamenti

Al termine di questo lavoro, vogliamo ringraziare sentitamente il Professor Ferdinando Mapelli e l'Ing. Davide Tarsitano per la disponibilità e la competenza professionale con cui ci hanno seguiti in questa tesi, oltre a tutti i Professori del Politecnico di Milano che in questi anni hanno contribuito alla nostra formazione.

Vogliamo inoltre ringraziare i nostri familiari, che ci hanno incoraggiato e sostenuto,

ed i nostri amici, che ci hanno aiutato (soprattutto Mario e Gionata) e sopportato (in particolare Lia).

Bibliografia

- [1] C.C.Chan, K.T.Chau, “*Modern electric vehicle technology*”, Oxford University Press 2001,
- [2] C.C.Chan, “*The state of the art of electric and hybrid vehicles*”, Proceedings of the IEEE, vol. 90, N 2, February 2002
- [3] S. Barsali, “*Sistemi elettrici di bordo: attualità e prospettive*”, Pisa, 14 giugno 2002
- [4] Ali Emadi, Young Joo Lee, and Kaushik Rajashekara, “*Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 6, Giugno 2008
- [5] P. Mugnetti, S. Carbone, G. Pedè, “*A fuel cell switcher locomotive with an hybridized propulsion system*”, 2002.
- [6] Andrew F. Burke , “*Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*”, Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4, Aprile 2007
- [7] Srdjan M. Lukic, Jian Cao, Ramesh C. Bansal, Fernando Rodriguez and Ali Emadi, “*Energy Storage Systems for Automotive Applications*”, Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 6, Giugno 2008
- [8] Fonte: Enea
- [9] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, and John M. Miller, “*Hybrid Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives*”, Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4, Aprile 2007

- [10] Z. Q. Zhu, and David Howe, “*Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*”, Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4, Aprile 2007
- [11] Mounir Zeraouia, Mohamed El Hachemi Benbouzid and Demba Diallo, “*Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study*”, IEEE Transactions on vehicular technology, Vol. 55, No. 6, Novembre 2006
- [12] Koji Imai, Takashi Ashida, Yan Zhang, and Shigeyuki Minami, “*Theoretical Performance of EV Range Extender Compared with Plugin Hybrid*”, Journal of Asian Electric Vehicles, Volume 6, No 2, Dicembre 2008
- [13] Thomas B. Gage, Michael A. Bogdanoff, “*Low-Emission Range Extender for Electric Vehicles*”, SAE transactions, 1997
- [14] <http://www.group Lotus.com/engineering/showcases.html>
- [15] <http://www.chevrolet.com/pages/open/default/future/volt.do>
- [16] David Wenzhong Gao, Chris Mi and Ali Emadi “*Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles*”, Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4, Aprile 2007
- [17] G. Braga, A. Farini, F. Fuga and R. Manigrasso. “*Synchronous Drive for Motorized Wheels without Gearbox for Light Rail Systems and Electric Cars*”, EPE, Firenze, 1991
- [18] Johannes J.H. Paulides, Evgeny V. Kazmin, Bart L.J. Gysen and Elena A. Lomonova, “*Series Hybrid Vehicle System Analysis Using an In-Wheel Motor Design*”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008, Harbin, China
- [19] Datasheet “*Bridgestone Dynamic-Damping In-wheel Motor Drive System*”
- [20] Datasheet “*Michelin ACTIVE WHEEL*”, Paris Motor Show press kit, Ottobre 2008

-
- [21] <http://www.volvocars.com/it-CH/footer/about/NewsEvents/News/Pages/>
- [22] <http://www.pmlflightlink.com/motors/>
- [23] <http://www.kokam.com> “Cell specification data”
- [24] G. Ferrari, “*Motori a combustione interna*”, Edizioni Il capitello, Torino
- [25] <http://www.phase.eu> “*Technical data summary*”
- [26] R. Manigrasso, F.L. Mapelli, M.Mauri “*Azionamenti elettrici*”, Pitagora, Bologna, 2007, Vol. I
- [27] F. Correggiari, “*Costruzione di macchine elettriche*”, La Goliardica, Milano, 1967
- [28] Stefano Barsali, Carmine Miulli, and Andrea Possenti, “*A Control Strategy to Minimize Fuel Consumption of Series Hybrid Electric Vehicles*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, VOL. 19, No. 1, marzo 2004
- [29] M. Bertolino “*Modello di simulazione per un veicolo ibrido elettrico bimodale: studio e validazione sperimentale*” Tesi di laurea, 2006-2007
- [30] M. Contrino “*Strategia di controllo di un veicolo ibrido Plug In: analisi numerica e validazione sperimentale*” Tesi di laurea, 2008-2009
- [31] Jianping Gao, Fengchun Sun, Hongwen He, Guoming G. Zhu, Elias G. Strangas, “*A Comparative Study of Supervisory Control Strategies for a Series Hybrid Electric Vehicle*”