



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MESSINA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA E CHIMICA DEI MATERIALI E
DELLE COSTRUZIONI

CICLO XXXV

A.A. 2021/2022

Sviluppo, Ottimizzazione e Validazione Hardware-In-the-Loop di Sistemi di Controllo Model-Based per veicoli HEV

Umberto Previti

SSD: ING/IND-09 Sistemi per l'Energia e l'Ambiente

Tutor:

Ch.mo Prof. Antonio Galvagno

Coordinatore del corso:

Ch.mo Prof. Giovanni Neri

SOMMARIO

Introduzione.....	iii
PARTE I Stato dell'arte.....	x
1. Teoria e Progettazione dei Veicoli ibridi.....	1
1.1. I Veicoli Ibridi.....	1
1.2. La Dinamica Longitudinale.....	15
1.3. La catena di trasmissione	19
1.4. Gli Accumulatori Elettrochimici.....	31
1.5. La modellazione delle batterie	47
1.6. Energy Management System e Metodi di Ottimizzazione.....	57
PARTE II Materiali e Metodi.....	63
2. Verifica e Validazione dei Componenti	64
2.1. Il Veicolo di Riferimento	64
2.2. Analisi e Validazione del Powertrain.....	66
3. Model-Based Design per lo sviluppo del Sistema di Controllo	96
3.1. Definizione dei requisiti.....	98
3.2. Modellazione e Simulazione	102
3.3. Coding.....	135
3.4. Test Model in the Loop	136
3.5. Test Software in the Loop.....	140
3.6. Test Hardware in The Loop	143

4. Risultati.....	157
4.1. Trasporto Pubblico nella Città di Messina.....	157
4.2. La linea 24.....	159
4.3. Comunicazione Veicolo Città	168
Conclusioni.....	175
Allegato A.1	180
Allegato A.2	182
Bibliografia.....	188
Lista Pubblicazioni	203

INTRODUZIONE

Il sesto rapporto di valutazione (AR-6), redatto dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), evidenzia quanto le condizioni climatiche, che l'uomo sta inequivocabilmente modificando, sono senza precedenti e prospetta degli scenari estremi per l'equilibrio terrestre e la salute dell'uomo. Secondo il Panel, è necessaria un'immediata inversione di rotta nell'utilizzo energetico odierno e nei processi che coinvolgono l'emissione di agenti inquinanti in atmosfera, per permettere all'ecosistema di avviare il ripristino, seppur lento e graduale, delle condizioni climatiche non critiche [1].

A livello globale, l'obiettivo è quello di non fare aumentare la temperatura media globale di 1,5 gradi celsius rispetto a quella preindustriale, come già stabilito nell'accordo di Parigi nel 2015; sopra questa soglia, avverte l'IPCC, molte conseguenze climatiche saranno irreversibili. L'ultimo report afferma che se non dovessero essere attuate immediatamente delle misure per ridurre l'emissione di gas serra, sarebbe impossibile evitare il raggiungimento del fatidico grado e mezzo entro i prossimi 20 anni, aggiungendo inoltre la concreta possibilità del superamento dei 2 gradi celsius[1]–[3].

Dalle simulazioni ottenute dal CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), frutto di un programma internazionale per la condivisione dei database, è stato possibile prevedere il raggiungimento del valore critico considerando 5 possibili scenari, o Percorsi Socioeconomici Condivisi (SSP). Gli scenari sono numerati in ordine crescente in base all'efficacia della politica di riduzione di emissioni: SSP1 indica un forzante radiativo, espresso in W/m^2 , pari a 1.9 ed è lo scenario migliore previsto dal panel. SSP5, che è il caso peggiore, prevede per l'anno 2100 un forzante radiativo pari a 8.5. Un forzante positivo è associato ad un riscaldamento della superficie terrestre, mentre un forzante negativo è associato ad un raffreddamento. Nel migliore dei casi (SSP1), quindi, verrà comunque raggiunto il valore critico di temperatura, ma la temperatura media globale si ripristinerà a valori non critici entro la fine del secolo[1]. Nel peggiore dei casi, SSP5, la temperatura media globale continuerà a crescere e si avrà un aumento di circa $5^{\circ}C$ entro la fine del secolo, come mostrato dal grafico in Figura 1.

Il rapporto evidenzia come il principale motore di questo cambiamento climatico sia la produzione dei gas serra, ossia i gas presenti nell'atmosfera terrestre che assorbono e trattengono

una grossa porzione dei raggi infrarossi emessi dalla superficie terrestre. I Gas Serra vengono classificati tramite l'utilizzo del *Global Warming Potential* [4], [5] (GWP, potenziale di riscaldamento globale) che restituisce una misura di quanto un dato Gas Serra contribuisca al riscaldamento globale. Il GWP di un Gas Serra viene calcolando tenendo in considerazione il potenziale di riscaldamento globale (IF, Impact Factor) che indica quanto tale gas incide sull'Effetto Serra (la CO₂ viene presa come gas di riferimento ed è caratterizzata da IF=1) e la concentrazione relativa di quest'ultimo in atmosfera in riferimento ad un tempo scelto (solitamente 20, 100 o 500 anni).

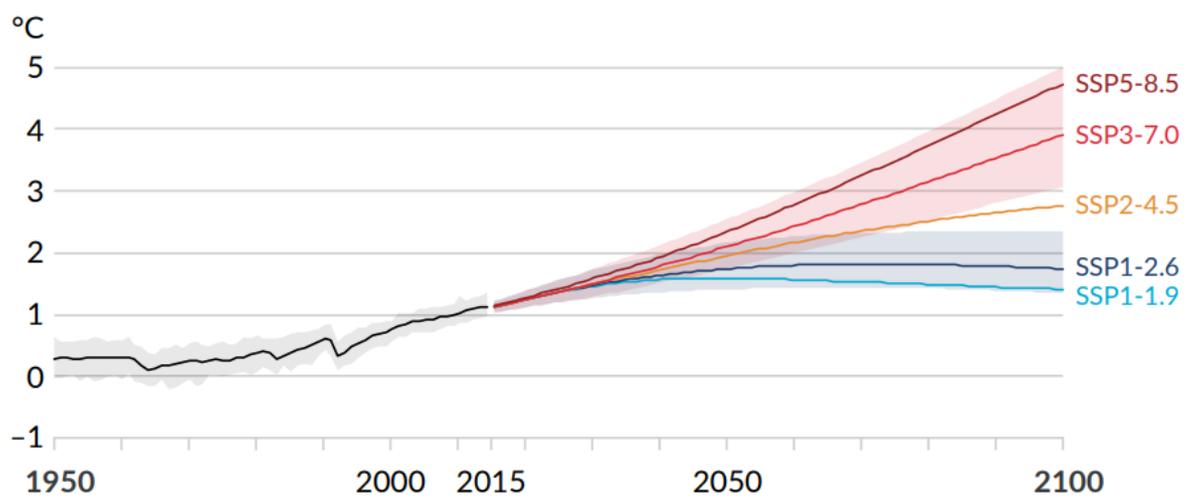


Figura 1: variazione della temperatura superficiale globale considerando cinque diversi scenari di variazione delle emissioni [1]

I principali Gas Serra presenti in atmosfera terrestre sono l'anidride carbonica (CO₂), il protossido di azoto (N₂O), il metano (CH₄) e gli alocarburi, tra cui gli idrofluorocarburi (HFC), clorofluorocarburi (CFC) e gli idroclorofluorocarburi (HCFC)[4], [6]. La Tabella 1 raccoglie i valori del GWP dei principali gas serra, valori che devono essere relazionati all'emissione annua del gas considerato. Dal 2011 la concentrazione dai gas serra è costantemente aumentata, considerando nel 2019 una media annua di 410 parti per milione (ppm) per l'anidride carbonica, 1866 parti per miliardo (ppb) per il metano e 332 ppb per il protossido di azoto. Si consideri che in epoca preindustriale (1750) i valori erano di 278 ppm per l'anidride carbonica, 750 ppb per il metano e 280 ppb per il protossido di azoto[1].

Secondo il rapporto dell’Agenzia Europea dell’ambiente, il settore dei trasporti è responsabile di circa un quarto delle emissioni totali di CO₂ in Europa, il 71,7% delle quali viene dal trasporto stradale [7]. Da questi numeri emerge che attuare delle politiche di miglioramento dell’efficienza del trasporto su strada possa dare un grande contributo alla riduzione delle emissioni di agenti inquinanti, soprattutto in riferimento all’anidride carbonica. Nonostante gli sforzi attuati dalle regolamentazioni, negli ultimi tre decenni l’unico settore a vedere un aumento delle emissioni di gas serra è stato quello dei trasporti, con un aumento del 33.5% tra il 1990 ed il 2019[8].

Tabella 1: Global Warming Potential dei principali gas serra [4].

GAS	GWP-20 ANNI	GWP-100 ANNI	GWP-500 ANNI
Biossido di carbonio (CO₂)	1	1	1
Metano (CH₄)	72	25	7.6
Protossido d’azoto (N₂O)	289	298	153
Idrofluorocarburo (HFC-23)	12000	14800	153
Idrofluorocarburo (HFC-125)	6350	3500	1100
Perfluorocarburo (PFC-14)	5210	7390	11200
Perfluorocarburo (PFC-116)	8630	12200	18200
Esfluoruro di zolfo (SF₆)	16300	22800	32600

Le emissioni di CO₂ nel settore del trasporto passeggeri differiscono in base alla modalità di trasporto (stradale, ferroviario, aereo e marittimo). Per quanto riguarda il trasporto su strada in Europa, le autovetture sono fra i mezzi più inquinanti, considerato che generano il 60,7% del totale delle emissioni di CO₂[8]. D’altro canto, le auto potrebbero rientrare fra le modalità di trasporto più *green* se aumentasse il numero di passeggeri per singolo veicolo. La media Europea di 1,7 passeggeri per auto [9], [10], candida le altre modalità di trasporto, come gli autobus, al titolo di alternative più ecologiche. Incentivare l’utilizzo di mezzi per il trasporto pubblico risulta quindi essere una risposta efficace, soprattutto se congiunta con un adeguamento alle tecnologie più recenti, come ad esempio ibridizzare la propulsione e/o l’alimentazione. Non a caso i mezzi di trasporto con propulsione ibrida sono oggi la più immediata risposta del mercato alle normative antinquinamento. Questi veicoli, provvisti solitamente di una trazione mista termica ed elettrica, riescono a combinare l’utilizzo del motore a combustione interna e di uno o più motori elettrici per ridurre l’utilizzo di combustibile a parità di tratta percorsa [11], [12]. L’alternativa definitiva al diretto utilizzo del combustibile nel trasporto su strada è rappresentata da veicoli con propulsione elettrica (Battery Electric Vehicle, BEV), o dalla sostituzione dell’alimentazione del motore termico con un’altra fonte di energia che non utilizzi i combustibili fossili (biofuel o etanolo), o l’utilizzo delle Fuel Cell. La tecnologia non ancora

matura per il trasporto su strada delle Fuel Cell, così come l'inadeguatezza dei sistemi di distribuzione dell'idrogeno, fanno sì che questa soluzione non sia immediatamente implementabile [13]. I veicoli puramente elettrici dimostrano costi estremamente elevati ed autonomie e tempi di ricarica non compatibili con le esigenze di mercato. Le tecnologie appena proposte, in ogni caso, possono prevedere l'immissione in atmosfera di anidride carbonica. La produzione dell'idrogeno, dell'energia elettrica e dei biocombustibili possono non essere processi *carbon neutral*, è quindi necessario condurre dei Life Cycle Assessment (LCA) per quantificare l'effettiva riduzione di emissione nociva delle nuove tecnologie rispetto alle tradizionali. Per questi motivi, ad oggi, il veicolo con propulsione ibrida risulta essere la risposta a breve termine più efficiente[14]. Tutti i veicoli con propulsione ibrida, a prescindere dalla motorizzazione e dalla loro architettura meccanica, sono dotati di un sistema di gestione della *powerunit*, cioè l'Energy Management System (EMS). L'EMS svolge il compito di migliorare l'efficienza complessiva del sistema in termini di risparmio di combustibile, gestisce la richiesta di potenza del guidatore e limita i punti di funzionamento ad alte emissioni [15]. L'ottimizzazione di questo algoritmo risulta quindi cruciale per raggiungere gli obiettivi, sia dinamici che di efficienza, richiesti al veicolo. Numerosi sistemi di controllo sono stati presentati in letteratura e possono essere inclusi in due grandi gruppi:

1) *Rule-Based*: questi controlli gestiscono le fonti di potenza attuando delle regole fisse. Solitamente le regole di controllo coinvolgono le mappe di efficienza del motore termico e dei motori elettrici installati a bordo per definire i punti di lavoro con miglior efficienza. La versione più semplice degli EMS *Rule-Based* è quella "deterministica", cioè dei controlli che operano solo l'accensione o lo spegnimento del motore termico, per trasformare la potenza meccanica in energia elettrica e riportare lo stato di carica delle batterie ad un livello definito accettabile. Questi controlli vengono solitamente impiegati quando il motore termico non provvede alla trazione, come negli ibridi serie [16][17]. Nei controlli ad "inseguimento di potenza" invece il principale input è la richiesta di potenza da parte del driver, e l'obiettivo del motore elettrico è quello di garantire sempre un certo sostegno al motore termico. Il termico lavorerà sempre in punti di lavoro ottimali mentre il motore elettrico cercherà di sopperire alle richieste del guidatore [18][19]. La versione più efficace dei sistemi di controllo *Rule-Based* è la strategia "multi-mode". Questa tipologia risulta sicuramente più complessa rispetto alle altre, ma dimostra una maggiore efficacia nella riduzione del consumo di combustibile. Gli algoritmi di gestione generalmente prevedono una modalità con trazione totalmente elettrica, una modalità termica e diverse modalità ibride. Nelle modalità ibride, il motore termico può avere il compito di dare

trazione e ricaricare la batteria, avere solo un ruolo marginale nella trazione o operare in punti di lavoro predefiniti [20][21] [22] [23].

2) *Optimization-Based*: Nelle *Optimization-Based*, l'obiettivo dell'EMS è quello di ottenere l'optimum globale minimizzando una funzione di costo che, nel caso degli HEV, solitamente è il consumo di combustibile o l'emissione di un agente inquinante. Gli ottimizzatori devono ricevere come input un determinato ciclo di guida, oltre a considerare i vincoli fisici del Motore a Combustione Interna (ICE), del Sistema di Accumulo Energetico (ESS) e della Macchina Elettrica (EM); ciò rende l'approccio al controllo non casuale [15]. Le più comuni strategie di ottimizzazione sono l'Equivalent Consumption Minimization Strategies (ECMS) ed il Model Predictive Control (MPC). L'ECMS considera, nella minimizzazione del consumo di combustibile, non solo il carburante utilizzato dal motore termico ma anche quello idealmente consumato dalla batteria. L'MPC invece deriva direttamente dalla Programmazione Dinamica e sfrutta questa tecnica per gestire i flussi di energia in funzione dell'obiettivo finale, noto che sia il ciclo di guida. Anche in questo caso le funzioni di costo coinvolgono la conversione dello stato di carica della batteria in consumo di combustibile da minimizzare. Esempi di queste modellazioni sono riportati in [24] [25] [26][27] [28][29].

Da quanto scritto emerge che molti sistemi di gestione e di controllo degli autoveicoli ibridi sono focalizzati maggiormente nel ridurre il consumo di combustibile del motore termico o, nel caso degli ECMS, il consumo equivalente. Nella valutazione di questi fenomeni però vengono ignorati i fenomeni di degrado della batteria. Durante il suo utilizzo la batteria è sottoposta a stress elettrici e termici che compromettono la sua funzionalità, causando una diminuzione della sua capacità di immagazzinare, e quindi di erogare, energia. Nelle moderne batterie agli ioni di litio, che sono anche quelle più diffuse in ambito *automotive*, il principale meccanismo di invecchiamento naturale è la crescita dello strato dell'Interfaccia di Elettrolita Solido (SEI) sull'elettrodo negativo (grafite) [30], [31]. Nello studio proposto da Cignini et al. [32] è stato valutato il fenomeno di aging delle batterie al fine di ottenere una previsione del dispendio economico a lungo termine della manutenzione dell'unità di potenza, ma non è stato utilizzato alcun modello matematico implementato in simulazione. La valutazione dell'aging è avvenuta riferendosi ai dati forniti dal produttore delle batterie. Inoltre, essendo l'autoveicolo analizzato con trazione puramente elettrica, non è stato valutato l'impatto di un processo di ottimizzazione nei confronti del fenomeno di aging. Padovani et Al.[33] hanno presentato uno studio in cui l'ottimizzazione dell' EMS avviene tramite l'utilizzo di ECMS considerando l'aging della

batteria. Il fenomeno di aging è stato valutato come una penalità dipendente dalla temperatura di utilizzo della batteria. Non è stato quindi effettivamente implementato un modello matematico che simuli il degrado della batteria. Tang et al. [34] hanno proposto un'ottimizzazione basata sull'aging della batteria. Il modello proposto per la valutazione dei fenomeni di degrado è di tipo semi-empirico, cioè coinvolge una serie di costanti interdipendenti che esprimono, nell'insieme, l'effetto delle correnti di esercizio, del SOC e della temperatura. Se l'obiettivo è quello di valutare l'effetto di ognuno di questi parametri sul degrado della cella, questo tipo di approccio può non essere adeguato. In generale la letteratura è ricca di modelli matematici od elettrochimici che valutano i fenomeni di aging, ma molti di questi sono utilizzabili solo per applicazioni stazionarie della batterie o sono difficilmente implementabili in algoritmi di gestione real-time tipici degli HEV, a causa della loro complessità computazionale[35]–[37].

Considerando quanto detto, è nata l'esigenza di approfondire i temi discussi per proporre una soluzione che sia immediatamente implementabile e che contribuisca allo sviluppo delle tecnologie per limitare gli effetti prodotti dal trasporto su strada. L'obiettivo di questo studio è indagare l'influenza dei componenti che equipaggiano il powertrain di un autobus con propulsione ibrida (termica\elettrica) sull'efficienza complessiva del sistema. Lo studio si propone inoltre di progettare l'algoritmo di gestione energetica del veicolo, che sia in grado di gestire i componenti dell'unità di potenza non solo in funzione delle richieste del driver ma anche in funzione di eventuali richieste provenienti dal mondo esterno. L'algoritmo sarà quindi ottimizzato al fine di minimizzare l'emissione degli agenti inquinanti ed il degrado degli accumulatori elettrochimici. La procedura di ottimizzazione, di tipo globale, deve essere di immediata implementazione negli hardware fisici oggi in commercio, per permettere l'applicazione del controllo sviluppato nel breve termine. Per raggiungere l'obiettivo, è stato necessario:

- 1) Creare il modello dinamico di un autobus con propulsione ibrida (termica ed elettrica) e validare le equazioni che lo definiscono sulla base di acquisizioni sperimentali. La validazione sperimentale del modello è necessaria per quantificare la differenza tra i dati simulati, base per lo sviluppo dello studio, e quelli acquisiti sperimentalmente.
- 2) Effettuare una comparativa tra gli organi meccanici e chimici che costituiscono il veicolo analizzando l'impatto di ognuno di essi sull'efficienza complessiva del veicolo, in modo da fornire delle indicazioni sui componenti che necessitano di una maggiore attenzione in

fase di progettazione per ottenere una riduzione, diretta o indiretta, delle emissioni di gas serra.

- 3) Progettare un sistema di gestione energetica in grado di controllare i propulsori ed i servizi del veicolo, ottimizzando il loro funzionamento durante il raggiungimento degli obiettivi imposti dal guidatore. Il compito del EMS è inoltre quello di minimizzare il consumo diretto (utilizzo del motore termico) ed indiretto di combustibile, preservando la vita dell'accumulatore elettrochimico e diminuire l'impatto ambientale dovuto allo smaltimento della componentistica. Il software di gestione è stato realizzato seguendo la metodologia del Model-Based Design e del *V-Cycle*, che rappresenta oggi la metodologia più efficace per ottenere una riduzione sia dei tempi di progettazione che testing. Il *V-Cycle*, analizzato nei paragrafi successivi, raccoglie infatti i passi da seguire per il corretto sviluppo di un software, dalla definizione dei requisiti, all'implementazione e test.
- 4) Implementare il codice di controllo all'interno di un hardware fisico, testarlo e renderlo disponibile agli utilizzatori, seguendo le indicazioni definite dal *V-Cycle*. L'urgenza presentata dai risultati dei report delle agenzie prima discusse chiarisce la necessità immediata di soluzioni concrete; l'implementazione in un hardware fisico permette di valutare se le soluzioni proposte possano essere attuate nel breve, medio o lungo termine, considerando le tecnologie oggi disponibili.

PARTE I
STATO DELL'ARTE

1. TEORIA E PROGETTAZIONE DEI VEICOLI IBRIDI

1.1. I Veicoli Ibridi

Si definisce veicolo ibrido (Hybrid Electric Vehicle, HEV), o in modo più appropriato veicolo a propulsione ibrida, un qualsiasi veicolo dotato di due o più sistemi che concorrono alla trazione o ad immagazzinare l'energia necessaria alla propulsione. Nello scenario più comune gli HEV sono dotati di un powertrain che contiene un motore a combustione interna e una macchina elettrica, anche se nulla vieta che l'energia venga trasformata in altre macchine come le celle a combustibile. Il principio che sta alla base della progettazione di un'autovettura con propulsione ibrida è quello di far lavorare in maniera sinergica i due propulsori per ottenere una riduzione dei consumi di combustibile per il motore termico, quindi anche delle emissioni di agenti inquinanti, oltre che ottenere un veicolo con una maggiore autonomia e una migliore guidabilità. Rispetto ai veicoli tradizionali della stessa categoria, la massa di un veicolo ibrido è generalmente maggiore, a causa dell'aggiunta della nuova, e molto complessa, componentistica elettrica ed elettronica. Questo aspetto comporta che il veicolo con propulsione ibrida abbia un costo maggiore rispetto all'analogo con propulsione tradizionale. Di contro si possono godere di numerosi benefici, quali:

- Elevata coppia, anche a bassi giri;
- Efficienza della macchina elettrica, mediamente, molto più elevata (80-90%) di quella del motore a combustione interna;
- Possibilità di ottimizzare la strategia di utilizzo del motore termico, inducendolo ad operare nella regione operativa di maggiore efficienza;
- Immediatezza della coppia fornita (possibilità di attuare strategie in cui il motore elettrico supporta il motore termico per avere maggiori performance e reattività);
- Possibilità di recuperare l'energia tramite il processo di frenata rigenerativa;
- Eliminazione delle perdite di slittamento delle frizioni, in quanto è possibile ingaggiarle quando motore termico e organo di trasmissione sono sincronizzati.

In funzione della natura e dell'impatto della tecnologia ibrida su un determinato sistema di propulsione, il vantaggio in termini di riduzione dei consumi può essere superiore al 30% rispetto ai propulsori basati su ICE. La Figura 2 confronta la riduzione percentuale di combustibile per

PARTE I

Stato dell'arte

tre diverse tecnologie di autovetture con propulsione ibrida (HEV case 1-3) e con propulsioni ibride innovative (Hydraulic Hybrid Vehicle, HHV, High Speed Flywheel, HSF).

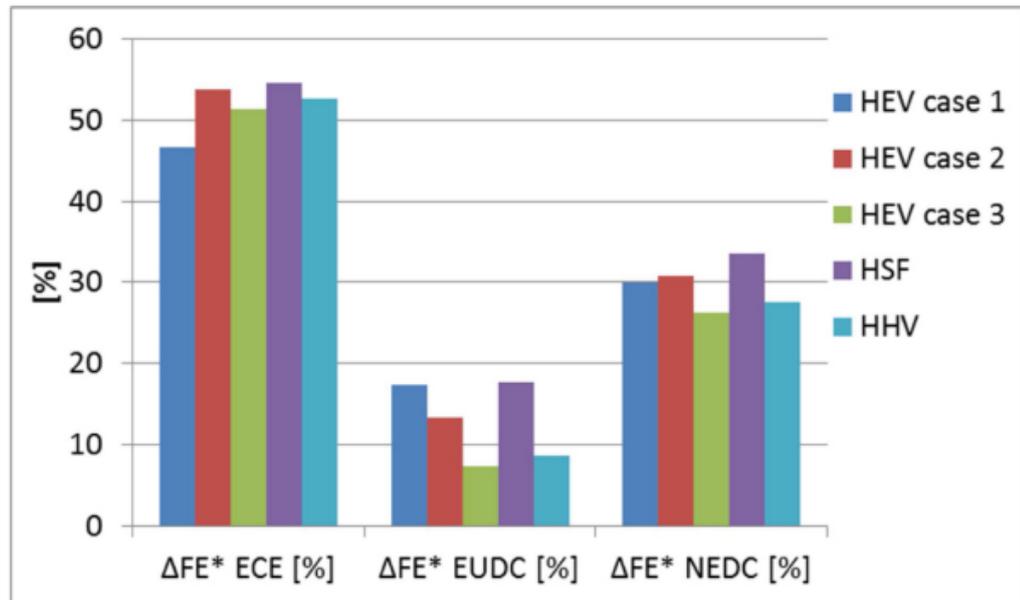


Figura 2 : Comparazione del consumo di combustibile di veicoli con propulsioni differenti durante l'esecuzione di cicli di omologazioni europei [38].

Esistono diverse metodologie per la valutazione delle architetture ibride. I parametri più rilevanti per definire un HEV sono [39][40]:

- Architettura del sistema;
- Rapporto di ibridazione HR.

Di seguito è rappresentata una classificazione compatta basata su questi due criteri.

1.1.1. Classificazione basata sul rapporto di ibridizzazione

I veicoli ibridi vengono suddivisi in diverse categorie in base al loro grado di ibridizzazione (Hybrid Ratio, HR), che è un indice di quanto la potenza del motore elettrico (P_{EMmax}) incida sulla potenza globale del veicolo (P_{tot}), data dalla somma delle potenze massime dei propulsori installati a bordo. L'HR è definito secondo l'equazione (1.1) [41].

$$HR = \frac{P_{EMmax}}{P_{tot}} \quad (1.1)$$

PARTE I

Stato dell'arte

In base al valore dell'HR, si distinguono[42], [43]:

- Micro Hybrid: $HR < 5\%$.
- Mild Hybrid (MHEV): $5\% \leq HR < 23\%$.
- Full Hybrid (FHEV): $23\% \leq HR < 45\%$.
- Plug-in Hybrid (PHEV): $HR \geq 45\%$.

1.1.1.1 Micro Hybrid

Questa categoria di veicoli è individuata da tutti quei propulsori termici che sono dotati della funzione Start and Stop (S&S) e di gestione dell'energia. A veicolo fermo, la funzione S&S spegne il motore a combustione interna, senza che sia necessario l'intervento del conducente (tramite la chiave di accensione). Quando il guidatore mostra l'intenzione di guidare (pedale della frizione premuto o pedale del freno rilasciato) il motore si riavvia automaticamente. Questo riduce il consumo di combustibile fino ad un valore di circa il 5% nell'uso urbano, si ha una riduzione praticamente nulla nell'uso extraurbano [44]. Un'altra caratteristica del Micro Hybrid è la funzione di gestione dell'energia, che ha lo scopo di massimizzare il consumo dell'energia nella batteria a bassa tensione (12V). In un veicolo con propulsione tradizionale, senza alcuna gestione energetica, la funzione primaria della batteria a bassa tensione è quella di generare l'energia elettrica necessaria all'avviamento del motore. Dopo l'avvio, l'energia elettrica per tutte le utenze elettriche viene fornita dall'alternatore, ossia un generatore di corrente che chiede carico meccanico al motore termico. Nel Micro Hybrid è la batteria che fornisce energia elettrica alle utenze. In questo modo, l'alternatore non deve produrre energia elettrica, la coppia di carico dell'alternatore è quasi nulla e il consumo di carburante si riduce. La batteria viene ricaricata quando il motore lavora nei punti più efficienti dal punto di vista del consumo di carburante o quando il veicolo sta frenando (attraverso il recupero di energia)[45], [46].

1.1.1.2 Mild Hybrid

Questa categoria di veicoli è individuata da tutti quei propulsori termici a cui è collegato un motore elettrico in grado di fornire, oltre le funzioni di S&S e di gestione dell'energia, coppia al motore termico secondo le tipologie di Torque Fill e Torque Boost. Quando il guidatore preme il pedale dell'acceleratore, la centralina (o gli organi di controllo) comanda una richiesta di coppia al gruppo propulsore. Un motore a combustione interna (soprattutto diesel) ha un certo ritardo nel fornire la coppia richiesta, ritardo imputabile all'inerzia dell'aria nel collettore di aspirazione

PARTE I

Stato dell'arte

e delle parti meccaniche (ad esempio il gruppo turbocompressore, fenomeno noto come turbolag), oltre che ad una limitazione elettronica per prevenire l'emissione di agenti inquinanti oltre la soglia fissata come limite. In queste situazioni, chiamate transienti di coppia (il motore sta cambiando il punto di funzionamento), il motore elettrico può fornire una coppia aggiuntiva per compensare il ritardo di risposta della coppia del motore. Questa funzione è chiamata Torque Fill. Un motore a combustione interna può generare una coppia massima in funzione del suo regime di rotazione. Aggiungendo la coppia del motore elettrico, oltre alla coppia del motore, si aumenta la coppia massima complessiva del gruppo propulsore (offset positivo)[47], [48]. Questa funzione è chiamata Torque Boost e può essere fornita solo per un breve periodo di tempo (ordine di secondi) a causa dell'esaurimento della batteria. Si noti, inoltre, che in questa tipologia di autovettura la macchina elettrica è alimentata da una batteria da 48-160V, generalmente agli Ioni di Litio, rispetto alla classica 12V al piombo acido delle Micro Hybrid [49].

1.1.1.3 Full Hybrid (FHEV)

Un'autovettura Full Hybrid è dotata di una macchina elettrica alimentata da una batteria ad alto voltaggio (200-300V) agli ioni di litio, in grado di erogare una potenza massima nettamente superiore rispetto ai casi precedenti (50 kW di media). In un FHEV il motore termico può generare energia meccanica da convertire in energia elettrica per la ricarica delle batterie (ibrido serie), oppure può contribuire alla trazione (ibrido parallelo).

1.1.1.4 Ibrido Serie

Il sistema ibrido serie non presenta alcuna connessione meccanica tra il motore a combustione interna e le ruote motrici. L'energia fornita dalla combustione è convertita in energia meccanica nel motore a combustione interna, la quale viene successivamente trasformata in energia elettrica per mezzo del generatore elettrico. L'energia elettrica fornita dal generatore viene immagazzinata in energia chimica nelle batterie e successivamente riconvertita in elettrica per poter alimentare il motore elettrico dimensionato in modo tale da fornire tutta l'energia meccanica per la trazione del veicolo [16][17]. Durante la partenza, l'accelerazione e una guida "normale" sia le batterie sia il motore a combustione interna, per mezzo del generatore, forniscono energia elettrica al convertitore di potenza; il convertitore di potenza alimenta il motore elettrico che, attraverso gli organi di trasmissione, fornisce potenza meccanica alle ruote motrici (Figura 3, caso a). Durante il funzionamento con bassi carichi, l'energia prodotta dal motore a combustione interna risulta essere maggiore rispetto all'energia richiesta dal veicolo così parte dell'energia in eccesso viene utilizzata per ricaricare le batterie fino a quando non

PARTE I

Stato dell'arte

raggiungono lo stato di carica massima (Figura 3, caso b). Durante la frenata o decelerazione il motore elettrico agisce come generatore trasformando parte dell'energia cinetica, posseduta dal veicolo, in energia elettrica caricando quindi le batterie attraverso il convertitore di potenza (Figura 3, caso c). Le batterie inoltre possono essere ricaricate dal motore a combustione interna, per mezzo del generatore e del convertitore di potenza, anche quando il veicolo risulta fermo (Figura 3, caso d).

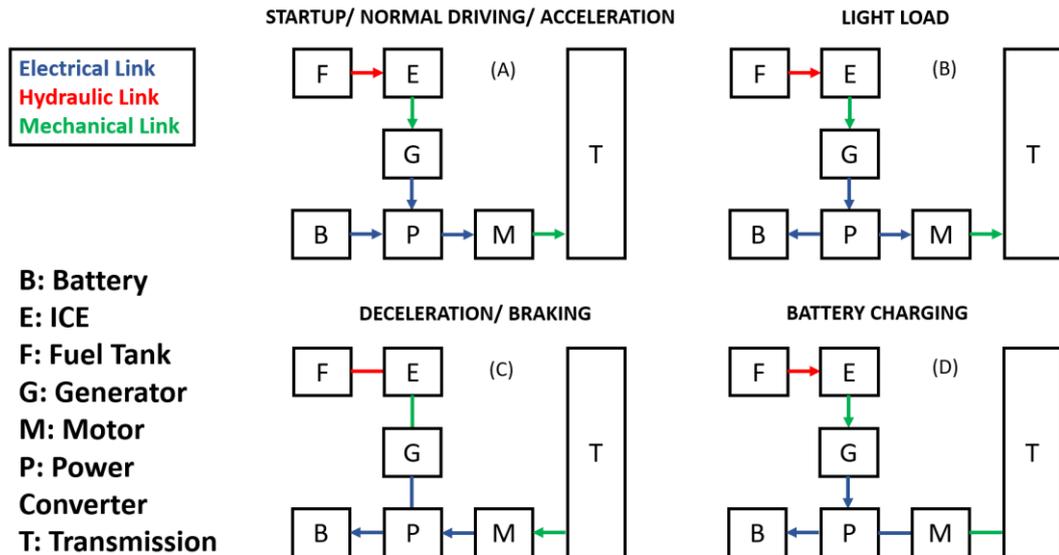


Figura 3: schema a blocchi dei modi operativi dell'ibrido serie

Rispetto ad un veicolo tradizionale, un veicolo ibrido serie consente di ottenere diversi vantaggi [50][51]:

- Il motore termico è meccanicamente svincolato dalle ruote e ciò consente di posizionarlo in maniera ottimale all'interno del veicolo;
- Il motore termico non è più costretto a seguire dinamicamente le richieste di potenza imposte dal conducente, dato che la propulsione è garantita dal motore elettrico; pertanto, può lavorare in punti operativi di elevata efficienza (strategia a punto fisso o a punti multipli funzione di esigenze costruttive, ad esempio limitazione dei fenomeni di NVH);
- Nell'uso urbano, il motore termico può essere dimensionato per una potenza più bassa rispetto ad un veicolo con propulsione convenzionale poiché il suo ruolo è legato principalmente al mantenimento della carica delle batterie di accumulo;

PARTE I

Stato dell'arte

- A differenza dei veicoli convenzionali, in cui per trasferire il moto ad entrambe le ruote motrici viene utilizzato un differenziale, nei veicoli ibridi serie possono essere usati due motori elettrici meccanicamente indipendenti, ognuno dei quali può pilotare il moto di una delle ruote di trazione.

Di contro, sono presenti i seguenti svantaggi:

- L'energia fornita dal motore termico viene convertita due volte (da meccanica ad elettrica e da elettrica a meccanica) quindi un basso rendimento del generatore e del motore elettrico possono causare dissipazioni significative, si rende necessario un accoppiamento dei componenti tale da permetterne il funzionamento in condizioni di alta efficienza;
- Il generatore aggiunge un costo ed una massa supplementare rispetto ai veicoli tradizionali;
- Il motore elettrico deve essere dimensionato per soddisfare la massima richiesta di potenza quindi l'aumento di costo e di massa sono rilevanti: il sistema di accumulo, di conseguenza, può assumere anch'esso dimensioni considerevoli.

1.1.1.5 Ibrido Parallelo

Il funzionamento di un veicolo ibrido parallelo si basa sulla possibilità di gestire i fornitori di potenza in modo indipendente e combinato: l'energia chimica contenuta nel combustibile immagazzinato nel serbatoio viene infatti trasformata, similmente a quanto avviene nei veicoli tradizionali, in energia meccanica attraverso il motore termico mentre la macchina elettrica scambia energia con il sistema di accumulo a cui è connessa. Dal lato meccanico, i motori cooperano per mezzo di un dispositivo che restituisce all'albero di trasmissione una potenza pari alla somma delle potenze dei due motori i quali, di conseguenza, possono funzionare in parallelo o separatamente. Le varie fasi del funzionamento di un veicolo ibrido parallelo possono essere schematizzate come in Figura 4. Durante la partenza, o elevate accelerazioni, sia il motore a combustione interna sia il motore elettrico forniscono la potenza necessaria per muovere il veicolo; tipicamente la distribuzione di potenza tra il motore a combustione interna e motore elettrico è dell'80% per il motore a combustione interna e del 20% per quello elettrico (Figura 4, caso a). Durante il normale funzionamento solo il motore a combustione interna fornisce al veicolo tutta la potenza necessaria per il suo movimento mentre il motore elettrico rimane spento (Figura 4, caso b). Durante la fase di decelerazione o di frenata il motore elettrico funziona come

PARTE I

Stato dell'arte

generatore e ricarica le batterie per mezzo del convertitore di potenza (Figura 4, caso c). Durante la fase di guida le batterie possono essere ricaricate attraverso il sistema di trasmissione o nel caso di sosta per mezzo di un generatore ausiliario (Figura 4, caso d).

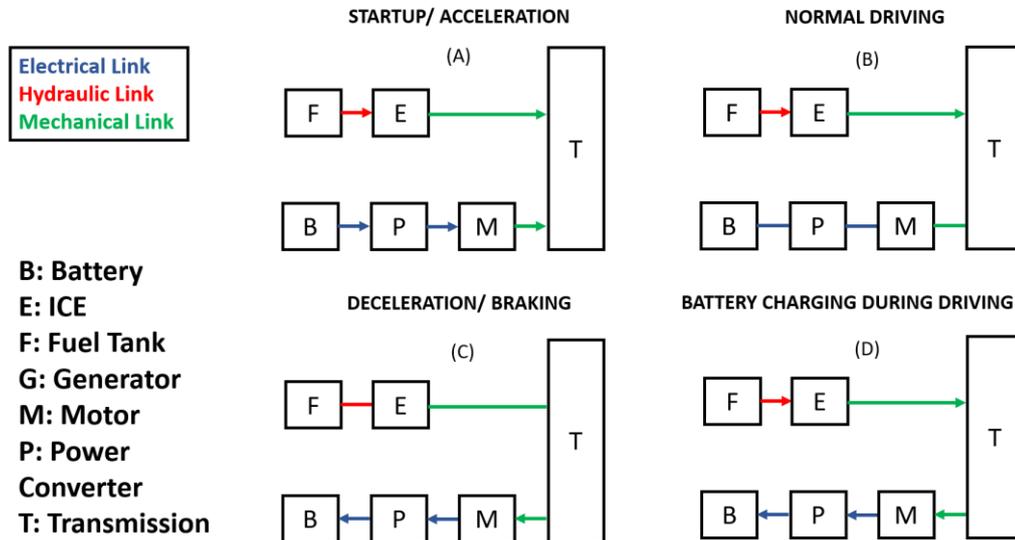


Figura 4: schema a blocchi dei modi operativi dell'ibrido parallelo

Un veicolo ibrido parallelo permette di ottenere diversi vantaggi sia rispetto ad un veicolo tradizionale sia rispetto ad un ibrido serie, in particolare [50], [52]:

- L'utilizzo di frizioni elettromagnetiche o di rotismi epicicloidali permette un'elevata flessibilità di accoppiamento tra i due motori: tali dispositivi, infatti, integrano meccanicamente i due motori permettendo loro tuttavia, se necessario, di non essere vincolati alla velocità di rotazione delle ruote del veicolo;
- La macchina elettrica può essere dimensionata per una potenza inferiore rispetto a quella dell'architettura serie dato che non è chiamato a coprire autonomamente l'intera richiesta di potenza da parte del guidatore. Nei veicoli attualmente in commercio, generalmente, il motore elettrico viene dimensionato per essere in grado di fornire solamente il 30-40% della potenza totale;
- Poiché il motore elettrico non viene dimensionato per l'intera potenza del veicolo, le batterie possono essere più piccole rispetto a quelle dell'architettura serie, quindi con vantaggi in termini di ingombro e di costo.

Di contro, sono presenti i seguenti svantaggi:

- Il motore termico è costretto a seguire dinamicamente le richieste di potenza del guidatore, le riduzioni dei suoi consumi e delle emissioni inquinanti sono più difficili da gestire rispetto all'architettura serie;
- Dovendo gestire due motori in grado di assicurare contemporaneamente la propulsione, la logica di controllo del mezzo diventa molto complessa.

1.1.2. Classificazione basata sulla posizione delle macchine elettriche

Lo sviluppo della tecnologia riguardo l'elettronica, la mecatronica e lo studio dei materiali ha fatto sì che i produttori di veicoli potessero sperimentare diverse configurazioni della disposizione delle macchine elettriche all'interno del *powertrain*, oltre che diverse strategie di controllo e di collegamento, diretto o indiretto, con il motore termico. Da ciò nasce l'esigenza di indicare le diverse posizioni e i ruoli delle macchine elettriche all'interno di un veicolo, in modo da rendere più agevole lo scambio di informazioni. Di seguito sono riportate le più comuni configurazioni, si tenga però presente che un veicolo con propulsione ibrida può presentare una o più configurazioni insieme.

1.1.2.1. Architettura Belt Starter Generator (BSG o P0)

Questa topologia ibrida è la più economica a causa dell'impatto limitato del sistema a 48V sull'architettura del veicolo esistente. Per ridurre al minimo i costi di integrazione, il veicolo e l'architettura della trasmissione dovrebbero essere mantenuti uguali a quelli di un veicolo convenzionale. Pertanto, il modo più semplice per ottenere un costo minimo è integrare la macchina elettrica a 48V nella trasmissione a cinghia degli accessori motore già esistenti, cioè sostituire l'alternatore a 12V[45], [53]. Lo schema dell'architettura di un ibrido Belt Starter Generator è riportato in Figura 5.

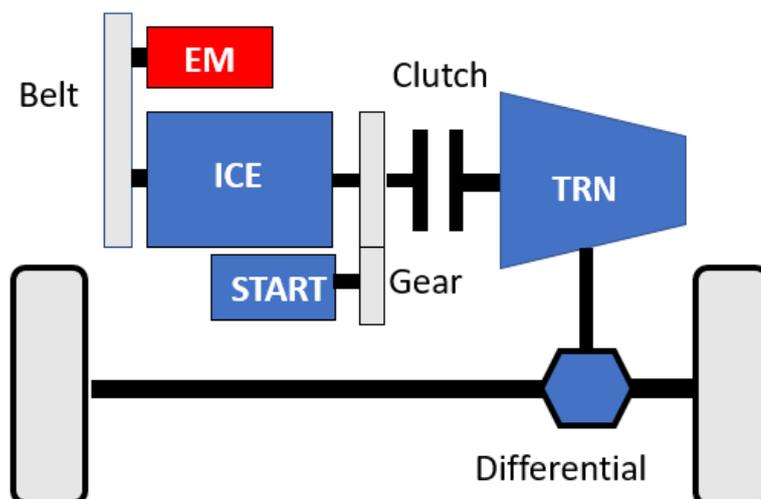


Figura 5: Schema di un powertrain ibrido con macchina elettrica in posizione P0.

1.1.2.2. Architettura con Macchina Elettrica in posizione P1

Nell'architettura P1, la macchina elettrica è collegata direttamente al motore termico e funziona da generatore durante la decelerazione del veicolo per produrre energia di ricarica per la batteria, mentre funziona da motore durante le accelerazioni del veicolo per assistere il motore, o da avviamento dopo la prima accensione. Il vantaggio principale dell'architettura P1, rispetto alla P0, è la rimozione della trasmissione a cinghia, fattore che riduce le perdite di trasmissione ed aumenta la potenza trasferibile (non si verifica lo slip della cinghia). D'altro canto, l'impatto sul costo e sull'impianto del veicolo tradizionale è molto più elevato [54]. Lo schema dell'architettura di un ibrido con macchina elettrica in posizione P1 è rappresentato in Figura 6.

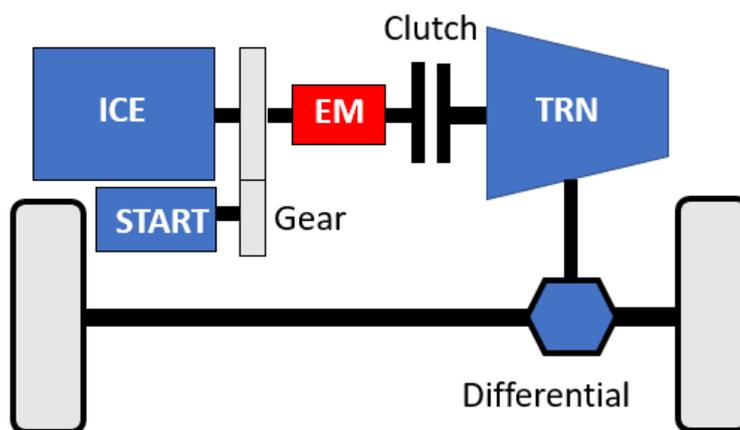


Figura 6: Schema di un powertrain ibrido con macchina elettrica in posizione P1.

1.1.2.3. Architettura con Macchina Elettrica in posizione P2

Nella configurazione P2 la macchina elettrica è fissata sull'albero primario del cambio, dopo la frizione, tramite accoppiamento meccanico che può prevedere un rapporto di trasmissione. Il vantaggio principale dell'architettura P2 è l'aumento del potenziale recupero energetico in frenata, grazie al possibile disaccoppiamento con il motore termico, oltre che la disponibilità di ulteriori funzioni di controllo. Lo svantaggio principale è il maggiore costo e complessità di integrazione[55]. Lo schema dell'architettura di un ibrido con macchina elettrica in posizione P2 è rappresentato in Figura 7.

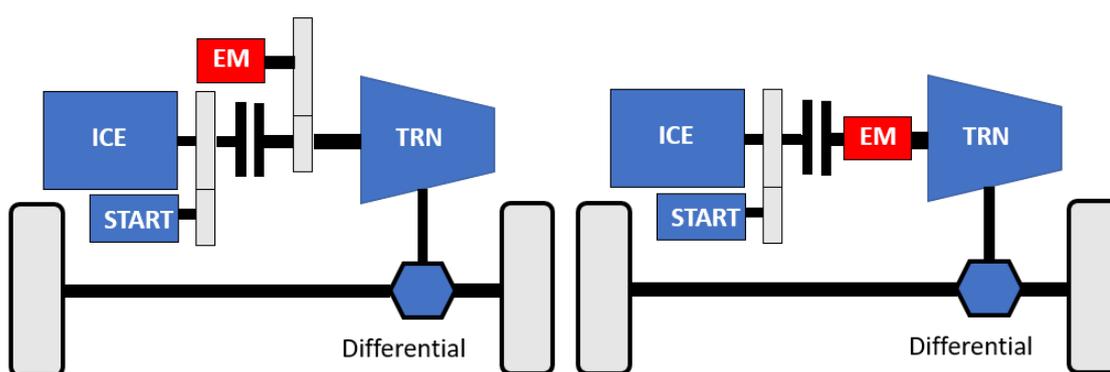


Figura 7: Schema di un powertrain ibrido con macchina elettrica in posizione P2, con e senza rapporto di trasmissione

1.1.2.4. Architettura con Macchina Elettrica in posizione P3 e P4

Nell'architettura ibrida P3 il motore elettrico è montato sull'albero di trasmissione, mentre nell'architettura P4 il motore elettrico è montato sull'asse posteriore o sui mozzi delle ruote. Il vantaggio principale della topologia P3 o P4 è il massimo potenziale di recupero energetico. Rispetto alle configurazioni P0, P1 e P2, le perdite del motore e della trasmissione, quando la trasmissione è scollegata, non influiscono sull'energia recuperata in frenata. Le architetture P3 e P4 danno anche la possibilità di guidare in modalità totalmente elettrica se dotate di una curva caratteristica in grado di soddisfare le esigenze di coppia e potenza. L'architettura P4, poi, conferisce al veicolo le capacità di trazione integrale, con l'assale anteriore azionato da un motore a combustione interna e l'asse posteriore azionato da una macchina elettrica [56]. Lo schema dell'architettura di un ibrido con macchina elettrica in posizione P4 è rappresentato in Figura 8.

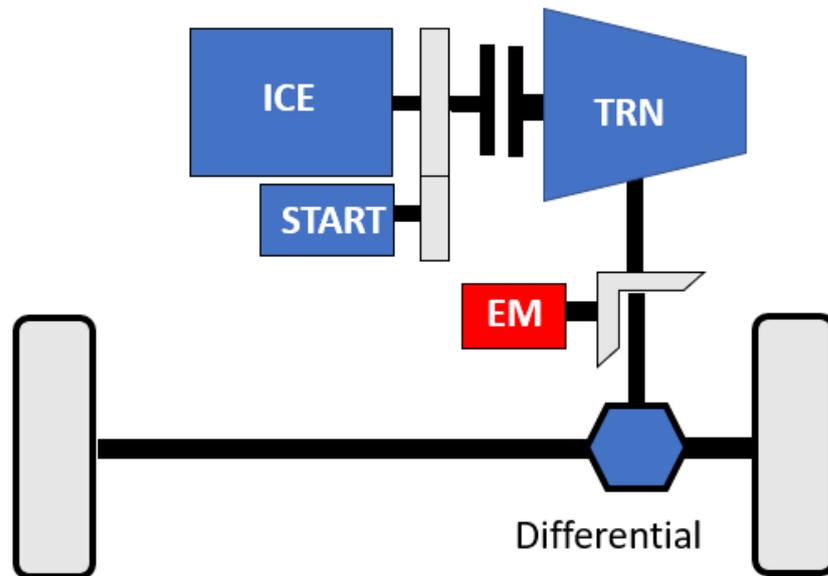


Figura 8 Schema di un powertrain ibrido con macchina elettrica in posizione P4

Dalla presentazione delle varie architetture è evidente quanto siano vaste le condizioni operative che un veicolo con propulsione ibrida può adottare. Per la progettazione del layout del powertrain del veicolo ci si serve, generalmente, di programmi di calcolo in grado di sviluppare modelli matematici che riescano a simulare le performance del veicolo al variare delle configurazioni appena descritte. La teoria che sta alla base della modellazione matematica di questi fenomeni è presentata nei capitoli successivi.

1.1.3. I Modelli Quasi Statici e Dinamici

In letteratura sono presenti diversi approcci alla modellazione e simulazione del comportamento di un veicolo, anche se quelli più largamente utilizzati sono la:

- Simulazione quasi-statica (QSS) o approccio backward-facing;
- Simulazione dinamica o approccio forward-facing.

I modelli QSS, descritti in [57]–[60], assumono che il veicolo soddisfi sempre perfettamente la traccia di velocità richiesta, calcolando la forza necessaria per accelerarlo a ogni passo temporale. Dalla velocità lineare del veicolo viene calcolata la velocità rotazionale dei componenti meccanici, mentre la forza di trazione/frenata viene convertita in coppia, considerando nel calcolo anche le efficienze dei componenti. Il calcolo “scorre a monte”, dalle ruote ai fornitori di potenza, cioè seguendo il flusso inverso a quello naturale. I principali vantaggi di questo approccio possono essere riassunti come segue:

- Le efficienze dei componenti, misurate sperimentalmente, vengono generalmente espresse come mappe funzione di velocità rotazionale e coppia, questo approccio ne permette l'applicazione e la validazione in tempi ridottissimi;
- L'approccio quasi statico permette di implementare routine di integrazione molto semplici (ad esempio, Eulero) con grandi passi temporali (fino anche ad 1 s).

I principali svantaggi che si possono incontrare nell'implementazione di un approccio QSS sono invece:

- Non è adatto per simulazioni che hanno come obiettivo la valutazione delle performance del veicolo, in quanto viene imposto un profilo di velocità che può non essere confacente alla sua vera risposta;
- Poiché l'uso dell'energia è stimato per mezzo di mappe sperimentali quasi statiche, il suo utilizzo non tiene conto degli effetti dinamici che coinvolgono la coppia e, conseguentemente, le velocità di rotazione;
- Non si basa direttamente sui segnali tipici di un guidatore, ad esempio la posizione dell'acceleratore e del pedale del freno.

PARTE I

Stato dell'arte

Se lo scopo del simulatore è quello di sviluppare una descrizione appropriata e realistica dei segnali disponibili alla centralina di controllo, per lo sviluppo dell'hardware e del software, sono necessari modelli di tipo forward-facing [61], [62].

L'approccio forward-facing si basa infatti su un modello numerico di guidatore che fornisce i segnali di acceleratore, freno e in alcuni casi anche la marcia da innestare. Il processo di calcolo procede dai fornitori di potenza che, erogando una certa coppia, trasferiscono potenza alle ruote e quindi al veicolo. I principali vantaggi della modellazione dinamica sono:

- L'utilizzo di coppie e segnali di controllo misurabili e realistici;
- Si possono includere modelli dinamici per la valutazione di fenomeni ad alta frequenza, non dipendendo più la simulazione dal campionamento dei segnali di input (come ad esempio la velocità).

Di contro, l'approccio dinamico alla simulazione presenta alcuni svantaggi, tra cui:

- Velocità di simulazione inferiore, dovuta alla necessità di integrare la velocità di risposta dei componenti del veicolo. La simulazione viene eseguita a passi temporali più piccoli per garantire la stabilità e l'accuratezza dello schema di integrazione.
- Non tutte le metodologie di ottimizzazione possono essere implementate, in quanto non è disponibile a priori l'evoluzione dei carichi nel tempo.

In questo studio verranno adottati entrambi i modelli in funzione dell'obiettivo della simulazione. Per la valutazione delle mappe o delle efficienze che definiscono alcuni componenti, come il motore termico e la macchina elettrica, verrà utilizzato un approccio quasi statico. L'efficienza di questi componenti dipende infatti dai loro punti di lavoro e tramite l'approccio quasi statico è possibile valutare la risposta delle mappe considerando i carichi meccanici o elettrici acquisiti sperimentalmente. L'approccio quasi statico può escludere la necessaria implementazione di sistemi di controllo sviluppati da terzi per lo studio del singolo componente, qualora siano noti i carichi sperimentali a cui è stato sottoposto, velocizzando la procedura di validazione dello stesso. Per la valutazione del sistema di controllo dell'unità di controllo, così come il suo processo di ottimizzazione, verrà altresì considerato un modello dinamico in grado di considerare gli effetti transitori e ad alta frequenza.

In ogni caso solo la dinamica longitudinale del veicolo è rilevante per raggiungere gli obiettivi del sistema di controllo sviluppato. Nelle sezioni successive verrà trattata una descrizione

PARTE I

Stato dell'arte

dettagliata delle equazioni utilizzate per modellare il comportamento del veicolo per ciascun componente. La principale differenza tra gli approcci QSS e dinamici risiede nella causalità fisica dell'instradamento dei segnali. Sebbene le equazioni di bilancio utilizzate siano formalmente le stesse, in molti casi il criterio di ingresso/uscita è opposto. La Figura 9 illustra il modello schematico QSS per un'HEV con architettura P2, mentre la Figura 10 offre una rappresentazione della causalità dinamica ingresso/uscita, riferita alla stessa architettura.

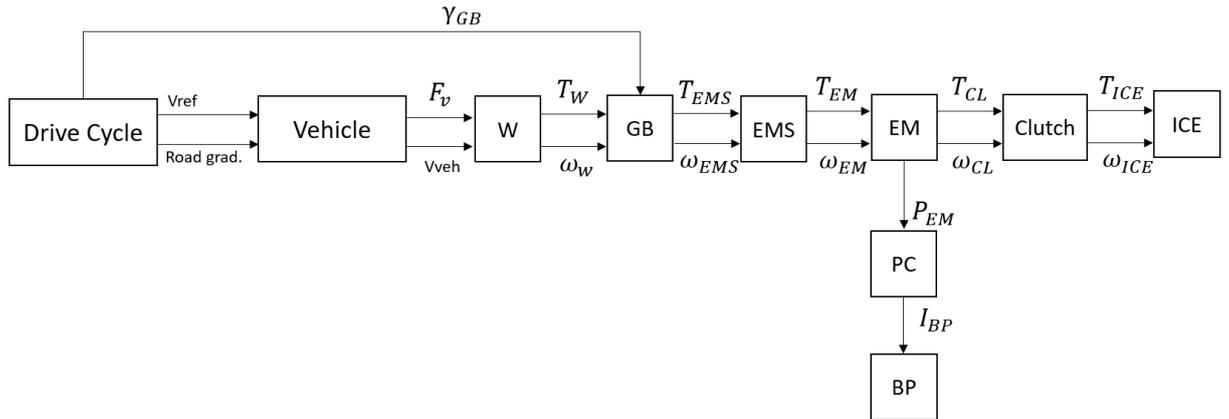


Figura 9: Schema di simulazione con un approccio Quasi Statico

Si può osservare che la differenza principale tra il QSS (Figura 9) e il modello dinamico (Figura 10) risiede nella causalità delle coppie e delle velocità per i convertitori di energia (macchine e trasmissioni meccaniche) e nella presenza di un guidatore, che gestisce i segnali di controllo per regolare la velocità del veicolo cercando di seguire un profilo di velocità imposto dall'esterno.

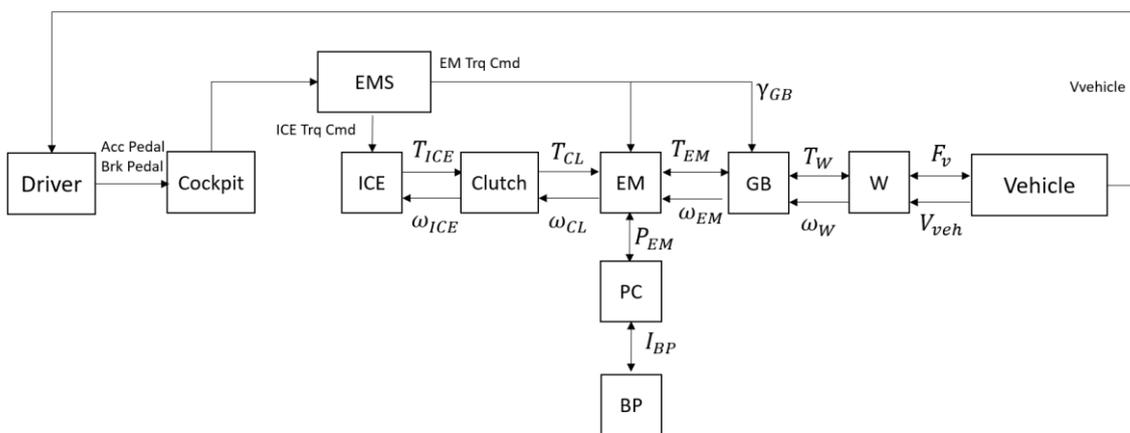


Figura 10: Schema di simulazione con un approccio dinamico.

1.2. La Dinamica Longitudinale

Durante il moto, il veicolo viene a contatto con la strada e il mezzo fluido entro cui si muove; l'interazione tra veicolo e ambiente causa delle forze resistenti agenti sul veicolo. In funzione della tipologia di forza interattiva è necessario definire il punto di applicazione della forza stessa rispetto al veicolo, così come la sua intensità e verso. Poiché il punto di applicazione della forza non influisce sull'efficienza energetica del veicolo, ma solo sulla sua cinematica, è uso comune immaginare di applicare tutte le forze che si oppongono al moto nel baricentro del veicolo stesso, mentre le forze che causano il moto sui punti di contatto delle ruote con il manto stradale[63], come mostrato in Figura 11.

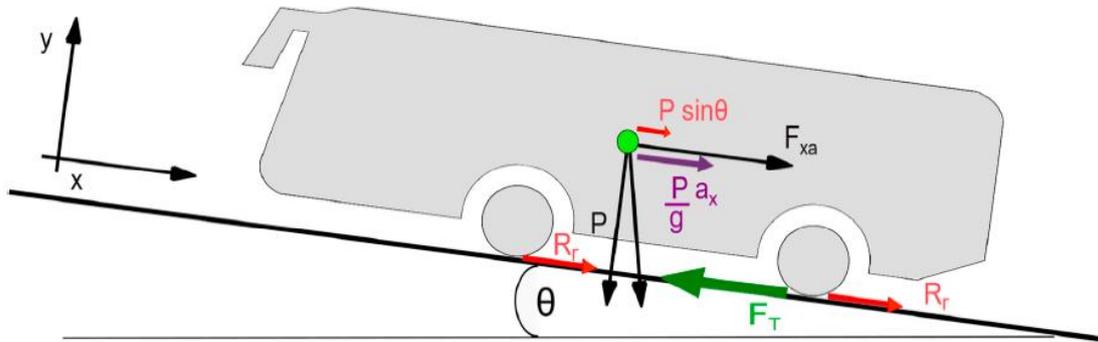


Figura 11: Contributi delle forze agenti sul veicolo

L'equazione che regola l'equilibrio del moto è presentata nella (1.2)

$$F_s(t) = F_i(t) + F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) \quad (1.2)$$

In cui $F_i(t)$ rappresenta la forza di inerzia, $F_a(t)$ la forza di resistenza aerodinamica, $F_r(t)$ la forza di attrito a rotolamento ed $F_g(t)$ è la forza apparente dovuta all'inclinazione stradale, tutte le forze sono espresse in Newton [N]. La forza aerodinamica è causata dal movimento relativo tra veicolo e fluido in cui si muove, che in questo caso è aria. Questa forza è strettamente legata all'area frontale del veicolo (A_f , in m^2), alla densità dell'aria (ρ_{aria} , in kg/m^3), al coefficiente di attrito aerodinamico del veicolo (c_x) e alla velocità relativa tra ambiente e veicolo (m/s) [64]. Considerando la velocità dell'aria nulla, la velocità relativa tra gli elementi a contatto è proprio pari alla velocità del veicolo, v . L'equazione (1.3) riporta l'intensità della forza di resistenza aerodinamica.

PARTE I
Stato dell'arte

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \rho_{aria} A_f c_x v^2(t) \quad (1.3)$$

La forza di attrito a rotolamento nasce dai fenomeni fisici che coinvolgono il rotolamento degli pneumatici sul terreno sotto l'azione dei carichi verticali. Durante il rotolamento dello pneumatico, la porzione di circonferenza a contatto con il terreno subisce una deformazione. Nell'area di contatto vengono generate tensioni, che sono sia normali (dovute al carico) sia di taglio. A causa dell'isteresi del materiale dello pneumatico, parte dell'energia spesa per deformare la sua carcassa viene restituita nella successiva fase di distensione. Ciò comporta un cambio nella distribuzione delle pressioni di contatto, che pertanto non sono simmetriche, ma sono maggiori nella zona davanti all'asse della ruota.

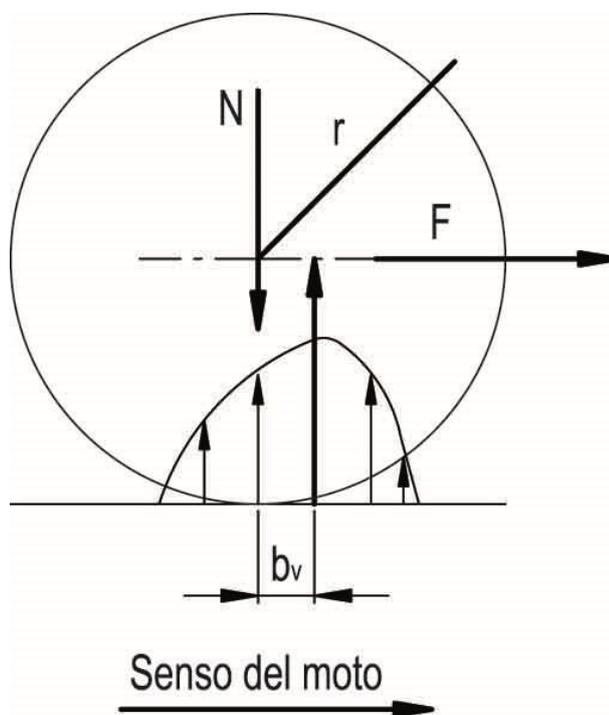


Figura 12: andamento delle pressioni e delle forze di contatto su uno pneumatico

Come mostrato in Figura 12, la risultante delle pressioni di contatto normali è spostata in avanti della distanza b_v (in m) rispetto al centro della ruota. Tale spostamento definisce il parametro di attrito volvente. Quindi, per muovere la ruota con velocità di avanzamento costante, è necessario vincere un momento di attrito volvente, M_w (Nm), definito nell'equazione (1.4):

PARTE I

Stato dell'arte

$$M_w = d \cdot N \quad (1.4)$$

La resistenza al rotolamento è espressa tramite una forza resistente che si oppone al moto di avanzamento, il cui valore è dato dal prodotto del coefficiente di attrito di rotolamento f_w per il carico verticale, come riportato nell'equazione (1.5).

$$F_r = f_w N = \frac{d}{R} N = f_w m_v g \cos \alpha(t) \quad (1.5)$$

Il calcolo di f_w può essere molto complesso ed esistono varie soluzioni in letteratura. In questo lavoro si è utilizzato il calcolo proposto da Kevin e Cooper, riportato nella (1.6).

$$f_w = 0.0085 + \frac{0.018}{p} + \frac{1.59 \cdot 10^{-6}}{p} v^2 \quad \text{se } v < 165 \text{ km/h} \quad (1.6)$$

In cui p è la pressione di gonfiaggio degli pneumatici espressa in bar, v è la velocità di avanzamento (in km/h) e α è l'angolo di inclinazione stradale, in rad. Si tenga conto che questa formulazione vale solo per velocità inferiori a 165 km/h, che sono velocità estremamente congruenti con il veicolo oggetto di studio [65], [66].

La forza dovuta all'inclinazione stradale è espressa dalla (1.7), ed è dovuta alla proiezione della forza peso del veicolo lungo la direzione del moto.

$$F_g = m_v g \sin \alpha(t) \quad (1.7)$$

La forza di inerzia del veicolo è espressa dalla (1.8)

$$F_i = \dot{m}_v \cdot \dot{v}(t) \quad (1.8)$$

Dove \dot{m}_v rappresenta la massa equivalente del veicolo. La forza di inerzia quantifica la resistenza al moto del veicolo considerando non solo l'effetto dovuto alla massa statica, ma anche la resistenza degli organi rotanti all'accelerazione angolare [67], [68]. In Generale, per un veicolo

PARTE I

Stato dell'arte

in configurazione ibrido parallelo, la massa equivalente può essere espressa tramite l'equazione (1.9).

$$\dot{m}_v = m + 2I_{wr}\tau_r^2 + 2I_{wf}\tau_f^2 + I_{ws}\tau_s^2 + I_{wp}\tau_p^2 + I_{wICE}\tau_{ICE}^2 + I_{wEM}\tau_{EM}^2 \quad (1.9)$$

Con:

- m massa del veicolo in kg;
- I_{wr} inerzia ruote posteriori in $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;
- I_{wf} inerzia ruote anteriori in $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;
- I_{ws} inerzia del secondario in $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;
- I_{wp} inerzia del primario in $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;
- I_{wICE} inerzia del motore termico in $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;
- I_{wEM} inerzia della macchina elettrica in $\text{kg}\cdot\text{m}^2$;
- τ è il rapporto di trasmissione esistente tra la ruota e l'elemento considerato, adimensionale.

Da quanto detto emerge che, seppure le ruote siano gli elementi che solitamente dimostrano avere il maggior contributo di inerzia, essendo il rapporto di trasmissione generalmente crescente dalla ruota fino ai motori, anche gli elementi con meno inerzia rotazionale possono influire molto sul calcolo della massa equivalente ed in maniera differente in funzione della marcia innestata. Per mezzi di grandi masse, come autobus o camion, la massa equivalente può essere calcolata sommando alla massa statica il prodotto della stessa, compresi eventuali carichi aggiuntivi, per un fattore γ_m , solitamente posto pari a 0.02[69].

La velocità angolare delle ruote (rad/s), così come la loro accelerazione angolare (rad/s^2), dipende dal raggio ruota (r_w , espresso in m), come riportato rispettivamente nelle equazioni (1.10) e (1.11).

$$\omega_w(t) = \frac{v(t)}{r_w} \quad (1.10)$$

$$\dot{\omega}_w(t) = \frac{\dot{v}(t)}{r_w} \quad (1.11)$$

PARTE I

Stato dell'arte

Mentre la coppia alle ruote ($T_w(t)$, in Nm) può essere calcolata tramite la (1.12)

$$T_w(t) = F_t(t) \cdot r_w \quad (1.12)$$

Dalla natura delle equazioni (1.11) e (1.12), è chiaro che per valutare la variazione temporale della coppia e della velocità alle ruote è necessario conoscere almeno la variazione temporale della velocità. Ciò significa che le equazioni sono sviluppate per seguire l'approccio quasi statico, in cui la velocità è nota ed il target di simulazione è valutare la risposta dei componenti. Se viene utilizzato l'approccio dinamico, invece, la causalità delle equazioni è invertita e la risposta della simulazione è l'accelerazione del veicolo, come riportato nella (1.13).

$$\dot{v}(t) = \frac{1}{m_v} \cdot \left(\frac{T_w(t)}{r_w} - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t)) \right) \quad (1.13)$$

Considerazioni analoghe sulle differenze tra gli input/output dei modelli QSS e dinamici sono valide per i blocchi descritti nelle prossime sezioni. Se non specificato verranno descritte le equazioni per l'applicazione di un approccio quasi statico, tenendo comunque conto che è sempre possibile ricavare l'equazione per l'approccio dinamico.

1.3. La catena di trasmissione

1.3.1.1 Freni

Il compito dei freni meccanici è quello di rallentare, fino eventualmente all'arresto, il veicolo. Ne esistono di diverse tipologie ma la maggior parte di essi sono basati sullo stesso principio di funzionamento, cioè causare dei fenomeni di attrito tra due componenti con velocità relativa per dissipare l'energia cinetica del veicolo in energia termica. I freni più diffusi attualmente nei mezzi di trasporto su strada sono i freni a disco. Questi sono formati da un disco realizzato in lega metallica resistente ad alte temperature, meccanicamente vincolato alle ruote del veicolo. In corrispondenza del disco freno è presente un elemento chiamato pinza, che contiene e sorregge le pastiglie del freno, ossia i componenti predisposti a strisciare sul disco per causare l'attrito. La pinza è collegata al telaio della vettura ed al circuito idraulico messo in pressione dal movimento del pedale del freno. Premendo il pedale del freno, una pompa mette in pressione il circuito idraulico che eserciterà quindi una forza sui cilindretti. Questi, generalmente costituiti in

PARTE I

Stato dell'arte

alluminio o acciaio inossidabile, spingono le pastiglie contro il disco freno, come mostrato in Figura 13.

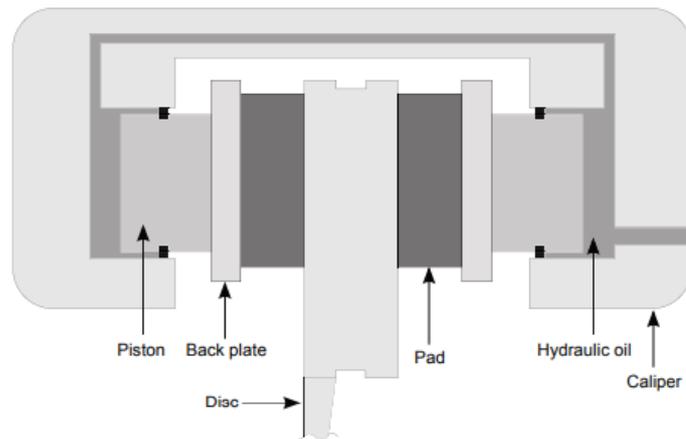


Figura 13: Schematizzazione dell'assemblaggio di un sistema frenante a disco [70]

Le pastiglie freno sono costituite da una base metallica sulla quale è applicato del materiale di attrito costituito da una miscela eterogenea di vari componenti metallici sinterizzati o agglomerati. In base alla composizione del materiale di attrito si può privilegiare l'efficienza, ovvero la forza frenante, o la loro durata. Le pastiglie, premendo contro il disco contemporaneamente da entrambi i lati, ne causano il rallentamento consentendo l'arresto del veicolo. La forza di attrito che si genera tra disco e pastiglie dipende dalla geometria del disco, dalla pressione esercitata dall'impianto frenante e dal coefficiente di attrito tra disco e pastiglie. La coppia frenante trasmessa alla singola ruota è riportata nell'equazione [70] (1.14).

$$M_b = n_p \cdot p_b \cdot A_b \cdot \eta_b \cdot \mu_b \cdot r_b \cdot c_b \quad (1.14)$$

In cui:

- M_b è la coppia frenante, espressa in Nm;
- p_b è la pressione ai freni, espressa in Pa;
- A_b è la superficie frenante, espressa in m²;
- η_b è l'efficienza del sistema idraulico, adimensionale;
- μ_b è il coefficiente di attrito tra pastiglie e disco freno, adimensionale;
- r_b è il raggio effettivo di frizione, espresso in m;

PARTE I

Stato dell'arte

- c_b è il fattore specifico di frenatura, adimensionale;
- n_p è il numero di pastiglie per ogni pinza freno, adimensionale.

1.3.2. Il Differenziale

Il gruppo differenziale, o semplicemente differenziale, è un organo meccanico che ha il principale compito di svincolare cinematicamente tra loro gli alberi condotti e di ripartire convenientemente la coppia motrice.

Durante il moto rettilineo, in condizioni di uguale aderenza, le ruote hanno la stessa velocità angolare. Quando il veicolo affronta una curva, invece, le ruote devono muoversi a velocità differenti per evitare strisciamenti indesiderati con l'asfalto. Immaginando che il veicolo affronti una curva a velocità costante, definito il raggio della stessa, le ruote interne devono avere una velocità angolare inferiore rispetto alle ruote esterne, che devono percorrere più spazio nella stessa quantità di tempo rispetto alle prime. Se le ruote fossero vincolate tramite un albero fisso, sarebbero sottoposte a strisciamento per poter percorrere la curva, causando instabilità al veicolo e usure anomale. Il differenziale riesce a trasferire coppia ad entrambe le ruote permettendo comunque una differente velocità angolare durante la percorrenza di una curva.

Lo schema più classico di un differenziale prevede la presenza dell'albero di trasmissione, proveniente dal cambio, vincolato meccanicamente ad una corona tramite l'accoppiamento corona pignone di ruote dentate coniche. Oltre che con l'albero di trasmissione, la corona è accoppiata con un'ulteriore coppia di ruote coniche, definite satelliti. I satelliti sono dotati di moto rotazionale solidale a quello della corona e di un eventuale moto rotazionale lungo il loro asse. I satelliti ingranano con i semiassi delle ruote motrici tramite delle ruote dentate, anch'esse coniche ed una per ogni asse, definite planetari. Quando il veicolo procede con moto puramente longitudinale la corona muove i satelliti che mettono in rotazione, lungo l'asse del moto della corona, anche i planetari. Quando il veicolo affronta una curva, il satellite ruoterà solidale alla corona ma anche intorno al proprio asse, con una velocità angolare pari alla differenza tra la velocità del semiasse collegato alla ruota interna alla curva e quella del semiasse collegato alla ruota esterna. Lo schema meccanico dei componenti di un differenziale è mostrato in Figura 14.

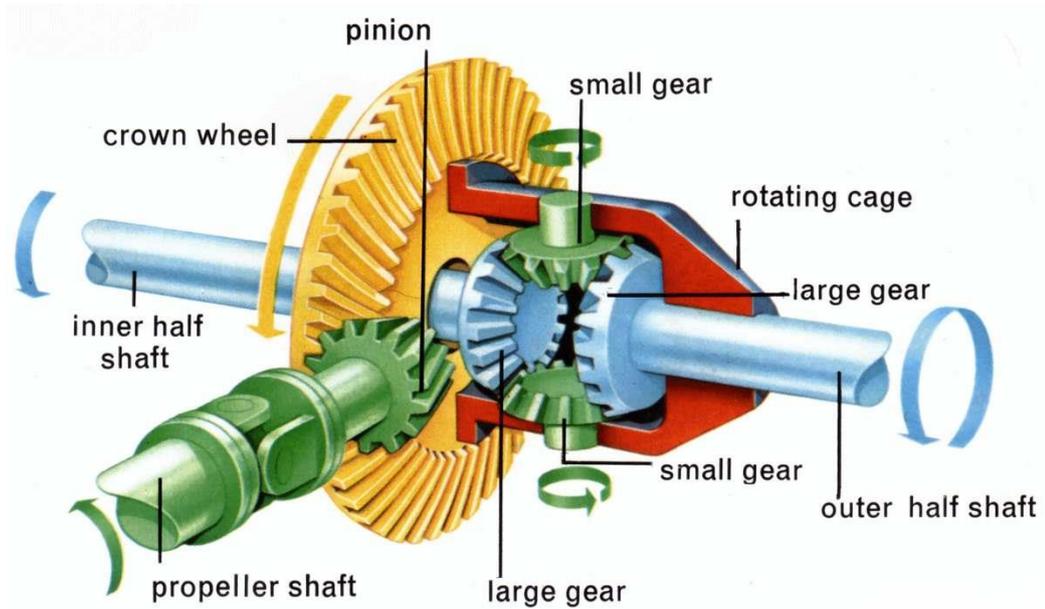


Figura 14: Schema meccanico di un differenziale tradizionale

Da quanto scritto si evince che il differenziale (o i differenziali sulle vetture a quattro ruote motrici) influenzano la dinamica del veicolo in quanto definiscono la massima accelerazione longitudinale e laterale, oltre che la stabilità e la guidabilità. Per questo motivo sono stati sviluppati differenziali molto evoluti, controllati elettronicamente per modificare il comportamento del veicolo nelle varie condizioni di marcia[71], [72]. Nel caso in esame è stato modellato un differenziale tradizionale, in quanto lo studio prevede il comportamento del veicolo in un moto prettamente longitudinale e non laterale. Il differenziale tradizionale fornisce sempre la stessa coppia sui due semiassi, non sfruttando di fatto il maggior carico sulla ruota esterna per incrementare la trazione. La semi-coppia che verrà trasmessa alle ruote dipende dalla coppia dell'albero di trasmissione e del rapporto di moltiplicazione che esiste tra albero e corona. Definendo con T_s la coppia all'albero di trasmissione, τ_{diff} il rapporto di trasmissione tra corona e pignone, T_c la coppia alla corona e η_{diff} l'efficienza del sistema meccanico, queste grandezze sono legate dall'equazione (1.15).

$$T_S(t) = \frac{T_c(t)}{(\eta_{diff}^{sign(T_c(t))} \cdot \tau_{diff})} \quad (1.15)$$

Essendo la coppia alla corona legata a quella alle ruote, in un differenziale tradizionale, secondo l'equazione (1.16)

$$T_w(t) = T_{wl}(t) + T_{wr}(t) = T_c(t) \quad (1.16)$$

Definendo con T_{wl} e T_{wr} rispettivamente la coppia alla ruota sinistra e la coppia alla ruota destra. L'efficienza del differenziale solitamente viene modellata considerando un valore costante. Tutte le coppie appena descritte sono generalmente espresse in Nm, mentre le efficienze ed i rapporti di trasmissione sono adimensionali.

1.3.3. Il Cambio Meccanico

Il cambio è il componente meccanico, interposto tra propulsori e differenziale, che ha lo scopo di adeguare le prestazioni dei propulsori alle esigenze del veicolo. I propulsori sono generalmente definiti entro un limite di coppia e di velocità dipendenti dalla loro tecnologia e progetto. L'assenza di rapporti di trasmissione tra propulsori e differenziale limiterebbe le prestazioni del veicolo in termini di accelerazione e velocità massima. Variando, seppur discretamente, il rapporto meccanico che esiste tra propulsore e differenziale è possibile variare la coppia di tiro alle ruote per adeguarla ai carichi esterni agenti sull'autoveicolo. In termini di prestazioni energetiche del veicolo il cambio assume un ruolo cruciale; infatti, permette di mantenere determinate velocità di rotazione del motore al variare della velocità longitudinale del veicolo. Poiché l'efficienza dei propulsori dipende dai loro punti di lavoro, tramite l'azione del cambio è possibile mantenere (entro certi limiti) punti di lavoro ottimali al variare della velocità di rotazione delle ruote. Il cambio meccanico tradizionale è costituito da due alberi, il primario collegato alla frizione ed il secondario collegato all'albero di trasmissione. Sul primario e sul secondario sono calettate delle ruote dentate, ognuna caratterizzata da un certo modulo e numero di denti, che ingranando tra di loro collegano meccanicamente albero primario e albero secondario e quindi frizione e albero di trasmissione. Le varie combinazioni di accoppiamento definiscono il numero di marce del cambio e, conseguentemente, il rapporto di trasmissione per ogni marcia. Il passaggio da una marcia ad un'altra può essere controllato manualmente dal guidatore o automaticamente da un controllo dedicato. I sistemi automatici più semplici di gestione delle marce definiscono la loro azione in funzione della velocità lineare del veicolo. Spesso è presente un'isteresi tra gli eventi di salita e discesa delle marce, per garantire la guidabilità del veicolo e la scelta degli eventi può essere inclusa nell'algoritmo di gestione energetica, per migliorare la selezione ottimale delle marce. Tuttavia, in questo caso, i modelli di veicoli ibridi paralleli orientati al controllo delle traiettorie delle marce potrebbero portare a un'elevata frequenza di eventi di cambio marcia, spesso legate a un piccolo vantaggio teorico in

PARTE I

Stato dell'arte

termini di consumo di combustibile, associato alla discretizzazione numerica delle mappe sperimentali. Per questo motivo, nella pratica si ricorre più spesso a modelli di cambio euristici. In condizioni di guida reali, in cui possono verificarsi forti accelerazioni o decelerazioni, un modello di cambio di marcia puramente basato sulla velocità può non essere sufficiente per sfruttare appieno il potenziale dei componenti del veicolo[73]. Di conseguenza, è possibile utilizzare mappe più dettagliate, in cui le linee di salita e di discesa dipendono anche dalla posizione del pedale dell'acceleratore e del freno (richiesta di potenza da parte del conducente). In questo caso, non vengono cambiate solo le linee di salita e discesa, ma viene progettato uno schema di cambio dedicato per le operazioni di decelerazione, per sfruttare in modo ottimale la frenata rigenerativa .

Ponendo con n il numero di marce del cambio e con i la marcia innestata, è possibile legare la coppia all'albero di trasmissione T_s alla coppia al primario (o alla frizione) T_p tramite la (1.17)

$$T_p(t) = \frac{T_s(t)}{\tau_i \cdot \eta_{GB}^{sign T_w}} \quad \text{con } i: 1,2,..n \quad (1.17)$$

In cui τ_i è il rapporto di trasmissione dell' i -esima marcia e η_{GB} è l'efficienza del cambio, entrambi adimensionali. L'efficienza del cambio può essere espressa in funzione della velocità di rotazione del primario, tramite l'equazione (1.18).

$$\eta_{GB} = \eta_0 - \frac{\eta_1}{\omega_1} \cdot \omega_p(t) \quad (1.18)$$

In cui η_0 , η_1 e ω_1 sono delle costanti ricavabili sperimentalmente e ω_p è la velocità di rotazione del primario, espressa generalmente in rad/s come ω_1 . È così possibile, inoltre, legare la velocità di rotazione del primario alla velocità di rotazione delle ruote, in moto rettilineo, tramite l'equazione (1.19). L'equazione (1.20) mostra la relazione tra l'accelerazione angolare dell'albero primario con l'accelerazione angolare delle ruote, entrambe in rad/s².

$$\omega_p(t) = \tau_i \cdot \tau_s \cdot \omega_w(t) \quad (1.19)$$

$$\dot{\omega}_p(t) = \tau_i \cdot \tau_s \cdot \dot{\omega}_w(t) \quad (1.20)$$

1.3.4. La Frizione

Come già accennato, nella maggior parte dei veicoli per trasporto su strada, l'albero primario del cambio non è collegato direttamente al propulsore, soprattutto se questo è a combustione interna. Il collegamento tra cambio e motore termico avviene tramite l'utilizzo di frizione e/o convertitori di potenza. Tramite il cambio meccanico è possibile ottenere il matching operativo tra velocità veicolo e velocità propulsore, ma questo non è possibile a tutte le velocità. Il cambio meccanico tradizionale, infatti, offre generalmente dei rapporti di trasmissione costanti e discretizzati in funzione della marcia innestata; esistono delle zone di transizione tra una marcia e l'altra in cui il propulsore ed il cambio non possono avere la stessa velocità. I motori a combustione dimostrano un regime minimo di rotazione sotto il quale possono incorrere al fenomeno di stallo e non riuscire più ad autosostenersi [74]. Questo è il motivo per cui il cambio meccanico ed il motore termico non possono essere accoppiati direttamente, soprattutto quando le velocità veicolo sono prossime a zero. La frizione assolve proprio al compito di disaccoppiare propulsore e cambio durante le fasi di transizione di marcia e/o a velocità del veicolo prossime al valore nullo. Le frizioni a secco o a umido non hanno capacità di amplificazione della coppia o riduzione di coppia, ma sono comunque soggette a perdite meccaniche. Le frizioni producono perdite sostanziali solo durante la prima fase di accelerazione, quando il veicolo parte da fermo. Se si assume che la velocità del motore sia costante durante questa fase di avvio, la frizione dissipa la seguente quantità di energia meccanica:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \Theta_v \cdot \omega_{w,0}^2 \quad (1.21)$$

dove $\omega_{w,0}$ è la velocità, riferita alla ruota, alla quale la velocità di ingresso della frizione (lato motore, ω_e) e la velocità di uscita (lato cambio, ω_{gb}) coincidono, generalmente tutte espresse in rad/s. L'inerzia Θ_v , in $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, comprende l'inerzia del veicolo e tutte le inerzie dovute alle parti rotanti situate dopo la frizione (come confermato dall'equazione (1.8) e (1.9)). La quantità di energia dissipata non dipende dal profilo di coppia della frizione durante il processo di chiusura della frizione.

Si noti che durante tutte le fasi di slittamento della frizione, la coppia $T_p(t)$ all'ingresso del cambio può essere diversa da quella erogata dal motore, dipendendo dalle caratteristiche della frizione e dal suo sistema di azionamento, ed è definita dall'equazione (1.22).

PARTE I

Stato dell'arte

$$T_p(t) = T_{p,max}(\Delta\omega(t)) \cdot u(t), \quad 0 \leq u(t) \leq 1 \quad (1.22)$$

L'equazione (1.22) lega la coppia al cambio $T_p(t)$, (in Nm), alla differenza di velocità $\Delta\omega(t) = \omega_e(t) - \omega_p(t)$ (in rad/s) tra motore e cambio e al comando di attuazione $u(t)$. $T_{p,max}$ rappresenta la coppia massima trasferibile dalla frizione, valutata secondo l'equazione (1.23), ed espressa in Nm.

$$T_{p,max}(t) = \text{sign}(\Delta\omega(t)) \cdot \left[T_b - (T_b - T_a) \cdot e^{-\frac{|\Delta\omega(t)|}{\Delta\omega_0}} \right] \quad (1.23)$$

I parametri $\Delta\omega_0$, T_a e T_b devono essere determinati sperimentalmente, dipendono dalla temperatura e dall'usura della frizione.

1.3.5. Il Motore Termico

Come per i componenti già descritti, anche per il motore termico può essere formulata una modellazione quasi statica ed una dinamica. Entrambi i tipi di modellazione coinvolgono la velocità di rotazione del motore, ω_e , la coppia erogata, T_e , e la potenza teorica di combustione P_c . Nella modellazione quasi statica, il flusso di calcolo procede dalla conoscenza della coppia e della velocità del motore verso il calcolo della potenza P_c . Nella modellazione dinamica, la potenza erogata dal motore causerà una coppia dipendente, comunque, dalla velocità di rotazione del motore. Queste grandezze sono legate tra loro secondo l'equazione (1.24).

$$\eta_e = \frac{\omega_e \cdot T_e}{P_c} \quad (1.24)$$

In cui η_e rappresenta difatti l'efficienza termodinamica del motore. La potenza teorica di combustione, P_c generalmente espressa in W, è pari al prodotto dalla portata di combustibile, \dot{m}_f ed espressa in kg/s, e dal suo potere calorifico inferiore, H_i espresso in J/s, come descritto dall'equazione (1.25).

$$P_c = \dot{m}_f \cdot H_i \quad (1.25)$$

PARTE I

Stato dell'arte

Nei modelli orientati al controllo e all'ottimizzazione dell'utilizzo dei propulsori di un veicolo ibrido, la rappresentazione di un motore a combustione interna è spesso affidata ad una semplice mappa sperimentale con punti di lavoro stazionari, ricavate tramite l'utilizzo delle equazioni (1.24) e (1.25). Tramite le mappe è possibile definire l'efficienza dei motori termici espressa come consumo di combustibile o di emissioni.

Se il motore è collegato meccanicamente alla catena cinematica, è possibile calcolare la coppia interna del motore, considerando il suo termine inerziale, tramite l'equazione (1.26):

$$T_{i,e}(t) = T_e(t) + \theta_e \dot{\omega}_e(t) \quad (1.26)$$

Essendo $T_{i,e}$ la coppia erogata dal motore (Nm), T_e la coppia richiesta dal controllo (Nm) e il prodotto tra θ_e ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) e $\dot{\omega}_e$ (rad/s^2) la coppia necessaria per vincere l'inerzia rotazionale del motore.

Nota la coppia netta del motore, il calcolo delle emissioni e del flusso di massa del carburante viene effettuato mediante le mappe introdotte in precedenza, in base al punto di funzionamento corrente, come riportato dall'equazione (1.27).

$$\dot{m}_{fuel} = f_e(\omega_e(t), T_{i,e}(t)) \quad (1.27)$$

I vincoli relativi al regime di rotazione del motore e alle limitazioni di coppia devono essere sempre rispettati, e sono spesso definiti dalle mappe stesse o generalmente dalle equazioni (1.28) e (1.29).

$$T_{ICE,min} \leq T_{ICE}(t) \leq T_{ICE,max} \quad (1.28)$$

$$\omega_{ICE,min} \leq \omega_{ICE}(t) \leq \omega_{ICE,max} \quad (1.29)$$

La Figura 15 mostra un'esempio di mappa di efficienza per un motore termico definita all'interno dei limiti di coppia massima e della velocità di rotazione minima e massima ammessa dal motore.

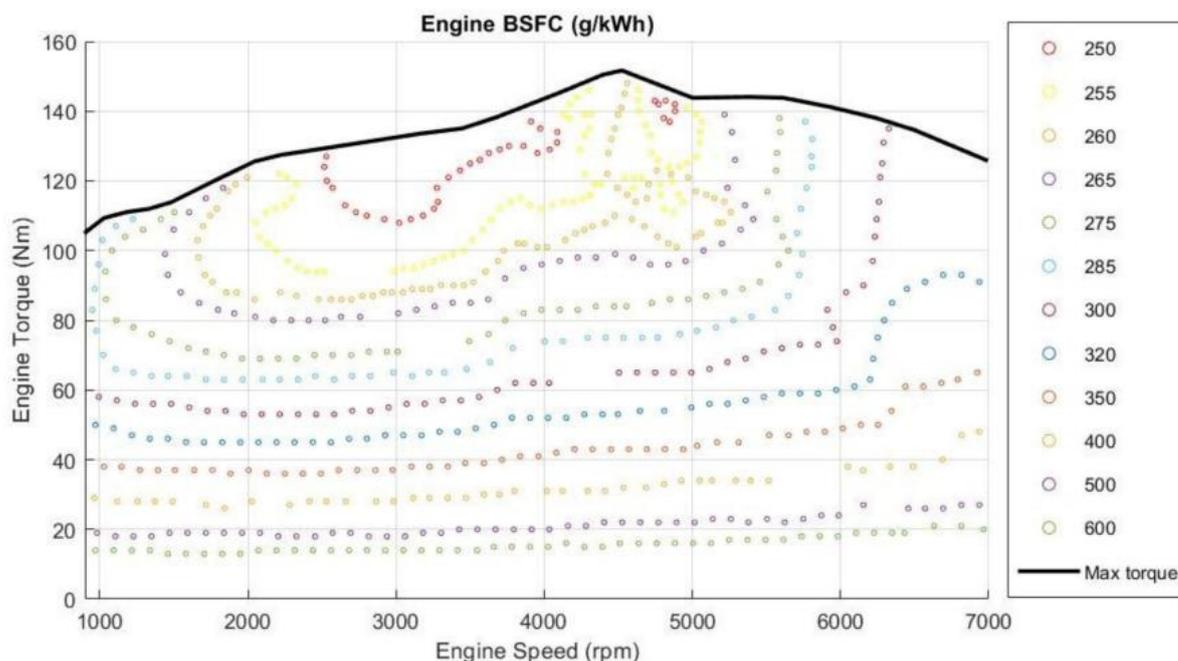


Figura 15: Esempio di una mappa che definisce il consumo specifico di un motore a combustione interna con alimentazione diesel [75]

1.3.6. La Macchina elettrica e l'inverter

Le macchine elettriche trovano posto nei veicoli con propulsione convenzionale come motorini di avviamento e alternatori. Nei veicoli elettrici e ibridi-elettrici, la macchina elettrica è un componente chiave. Di solito si tratta di una macchina reversibile, che può funzionare in diversi modi:

- convertire l'energia elettrica della batteria in energia meccanica per guidare il veicolo;
- convertire l'energia meccanica del motore in energia elettrica per ricaricare la batteria;
- recuperare l'energia meccanica disponibile alla trasmissione per ricaricare la batteria (frenata rigenerativa).

Nella prima modalità di funzionamento la macchina elettrica agisce come motore, drenando potenza dalla batteria trasformandola in potenza meccanica. Nelle ultime due condizioni operative la macchina elettrica funziona da generatore, convertendo l'energia meccanica in ingresso in energia elettrica per la ricarica della batteria. Le caratteristiche che definiscono una macchina elettrica adeguata all'applicazione in un HEV includono generalmente alta efficienza, basso costo, alta potenza specifica, buona controllabilità, tolleranza ai guasti, bassa rumorosità e uniformità di funzionamento (basse fluttuazioni di coppia)[74], [76].

PARTE I

Stato dell'arte

Le macchine elettriche ricevono generalmente l'alimentazione da una fonte di energia elettrica (Batterie, fuel cell) tramite dei convertitori di potenza, il cui compito principale è quello di gestire i flussi di potenza e di corrente tra i due componenti. In funzione della tecnologia costruttiva della macchina elettrica, questa può essere alimentata in corrente continua o in corrente alternata. Oltre al tipo di alimentazione è importante definire il segno della stessa, cioè comandare il funzionamento da generatore o da motore, così come la rotazione in senso orario o antiorario. Come tutte le componentistiche finora trattate, anche l'inverter ha una sua efficienza elettrica. Generalmente l'inverter e la macchina elettrica costituiscono un unico pacchetto hardware; quindi, l'efficienza dell'inverter è spesso inclusa nel computo dell'efficienza della macchina elettrica, che di fatto diventa un'efficienza complessiva. In questa trattazione l'efficienza dell'inverter è inglobata nell'efficienza della macchina elettrica, verrà comunque considerata un'efficienza costante che computa le perdite nei collegamenti elettrici tra batteria e modulo di potenza, e nelle altre componentistiche elettroniche.

La rappresentazione della causalità di un motore/generatore nelle simulazioni quasi statiche è schematizzata nella Figura 9. Le variabili di ingresso sono la coppia T_{em} e la velocità ω_{em} richiesta all'albero, mentre la variabile di uscita è la potenza elettrica, P_{em} , definita tramite l'equazione (1.30)

$$P_{em} = V_{em} \cdot I_{em} \quad (1.30)$$

In cui I_{em} rappresenta la corrente elettrica che attraversa gli avvolgimenti della macchina (A) e V_{em} la tensione di alimentazione (V). Il valore positivo di P_{em} (W) indica che la macchina sta dissipando energia, operando quindi da motore, mentre un valore negativo di P_{em} indica che la macchina sta assorbendo energia, operando quindi come generatore.

La relazione tra la potenza elettrica e la potenza meccanica, P_{em1} , può essere calcolata senza un modello dettagliato del sistema quando è disponibile una mappa stazionaria dell'efficienza della macchina (η_{em}) in funzione delle variabili di ingresso. In questo caso, la potenza elettrica richiesta o fornita dalla macchina è valutata tramite le equazioni (1.31) e (1.32).

$$P_{em} = \frac{P_{em1}}{\eta_{em}(\omega_{em}(t), T_{em}(t))}, P_{em1} > 0 \quad (1.31)$$

PARTE I
Stato dell'arte

$$P_{em} = P_{em1} \eta_{em}(\omega_{em}(t), -T_{em}(t)), P_{em1} < 0 \quad (1.32)$$

In maniera analoga al motore termico, anche in questo caso i limiti di coppia e velocità di rotazione devono essere rispettati. Mentre esiste un valore di velocità di rotazione massimo, generalmente non esiste un valore minimo positivo di velocità di rotazione per le macchine elettriche. I limiti meccanici da rispettare sono espressi tramite le equazioni (1.33) e (1.34) e riportati in una mappa esemplificativa mostrata in Figura 16.

$$\omega_{em} \leq |\omega_{em,max}| \quad (1.33)$$

$$T_{em}(t) \leq |T_{em,max}| \quad (1.34)$$

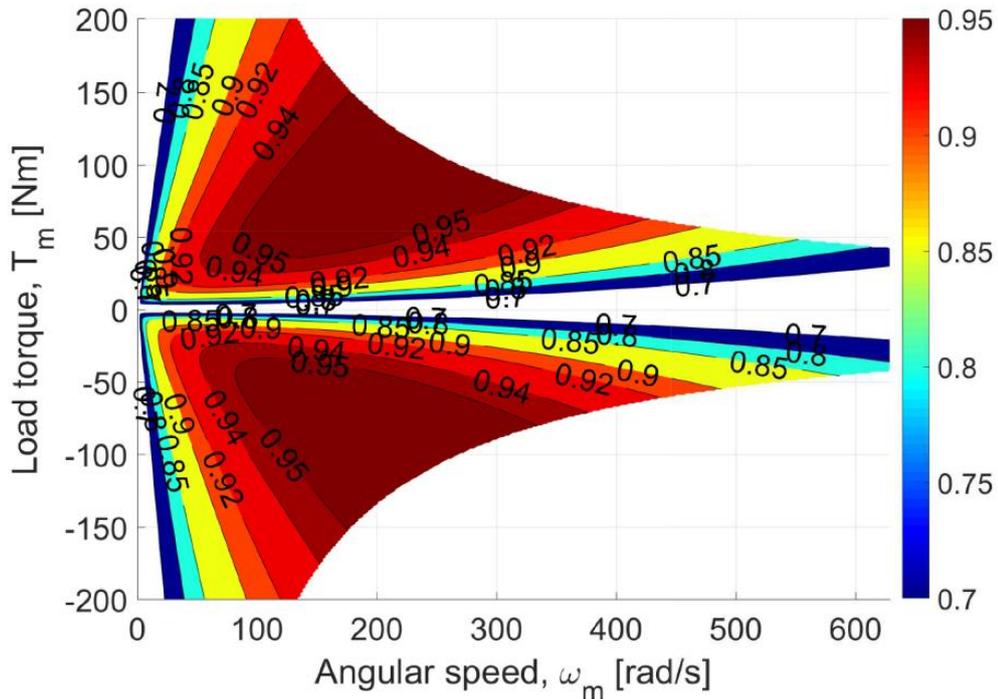


Figura 16: Mappa di efficienza e limiti di coppia per una macchina elettrica [77]

La curva di coppia è tipicamente costante fino a una certa velocità di rotazione, poi diminuisce iperbolicamente con la velocità. Questa dipendenza indica che nella macchina elettrica viene limitata prima la corrente e poi la potenza. A bassa velocità, la limitazione della corrente è attiva, quindi la coppia è limitata. A velocità più elevate, è attiva la limitazione della potenza da cui si

può ricavare la dipendenza iperbolica [76]. Di conseguenza, la forma della curva di coppia massima è totalmente diversa da quella dei motori termici, che in genere è quadratica. Si tenga conto però che per brevi periodi di tempo i motori elettrici possono lavorare anche a potenze più elevate (potenza di picco o spunto).

1.4. Gli Accumulatori Elettrochimici

Al giorno d'oggi la ricerca tecnologica ha fatto sì che nel mercato sia disponibile una grande varietà di batterie di accumulo per la trazione (batterie secondarie o accumulatori), studiate proprio con lo scopo di fornire potenza adeguata alla propulsione di un veicolo (e.g. un'automobile elettrica, un ciclomotore, un veicolo commerciale). Nel campo della trazione elettrica, le tecnologie di accumulo di energia hanno dato vita ad una vasta gamma di soluzioni che si differenziano non solo per i materiali che li costituiscono, ma anche per i principi di funzionamento .

Convenzionalmente le specifiche tecniche della batteria, indipendentemente dalla sua tecnologia, vengono definite basandosi sui parametri elencati di seguito:

- Tensione Nominale (V) – tensione ai capi della batteria riportata dal costruttore, solitamente valutata in condizioni standard.
- Tensione di Cut-off (V) – tensione minima ammissibile per la cella. Generalmente è il valore che fa da discriminante tra una batteria carica e una scarica .
- Capacità nominale (Ah) – definisce la quantità di ampere-ora disponibile quando la batteria è scaricata ad una certa corrente dalla condizione di piena carica fino alla tensione di Cut-off. La capacità è calcolata moltiplicando la corrente di scarica per il tempo di scarica.
- Energia Specifica (Wh/kg) – l'energia nominale della batteria per unità di massa, a volte indicata come densità di energia gravimetrica. Questa è una caratteristica della tecnologia della batteria e della disposizione delle celle all'interno del pacco batteria.
- Resistenza interna – la resistenza elettrica che sperimenta la batteria durante le fasi di carica o di scarica, generalmente differenti.
- C- ed E- rate – la corrente di scarica è spesso espressa come C-rate, al fine di normalizzarla nei confronti della capacità della batteria, che solitamente è differente tra le varie batterie. 1C rate indica che la corrente scaricherà completamente la batteria in 1 ora. Gli E-rate sono gli analoghi del C-rate, considerando l'energia [78].

PARTE I

Stato dell'arte

Per definire lo stato della batteria durante il suo utilizzo ci si serve dei parametri elencati di seguito:

- Stato di carica (SOC) (%) – è un'espressione della capacità attuale della batteria come percentuale della massima capacità. Il SOC è generalmente calcolato integrando la corrente per determinare il cambiamento della capacità nella batteria nel tempo.
- Profondità di scarica (DOD) (%) – è la percentuale della capacità della batteria persa a causa della corrente di scarica.
- Tensione ai terminali (V) – è la tensione valutata ai capi della batteria durante l'applicazione di un carico elettrico. La tensione ai terminali è direttamente dipendente dal carico elettrico e dallo stato di carica della batteria [79].
- Tensione di circuito aperto (OCV) (V) – è la tensione valutata ai capi della batteria quando nessun carico elettrico è ad essa collegato. Dipende dallo stato di carica della batteria

I parametri soprelencati vengono utilizzati per caratterizzare e confrontare le batterie di diverse tecnologie, essendo spesso dei valori normalizzati rispetto a grandezze universali. Non sempre una batteria che risulta essere adatta ad una particolare applicazione risulta essere la più performante in un campo di applicazione diverso. Risulta quindi fondamentale potersi riferire a questi parametri per valutare le *performance* di una batteria e relazionarla all'uso a cui è destinata. In questo studio verranno confrontate tre delle principali tecnologie che vengono oggi utilizzate per la produzione di accumulatori elettrici, che sfruttano le reazioni di ossido riduzione che coinvolgono elettrodi a base di: litio, piombo e nichel[80]–[82] .

Gli accumulatori che sfruttano elettrodi costituiti principalmente da piombo sono dotati della tecnologia più matura e collaudata. I materiali che costituiscono queste celle non dimostrano gravi problemi legati alla sicurezza e nel reperimento delle materie prime per la produzione; questi aspetti incidono enormemente sui costi di produzione. Di contro le batterie al piombo sono caratterizzate da un basso valore di potenza specifica e una durata limitata in applicazioni con carico estremamente variabile (tipico del trasporto su strada).

Le celle alcaline basate sugli elettrodi di Nichel-Cadmio o Nichel-Metallo si sono proposte come alternative alle celle al piombo già dal 1950. Queste celle sono generalmente fornite con un potenziale tra gli elettrodi di 1.2V, simile al potenziale delle celle al piombo, ma con il doppio dell'energia specifica, oltre che da una resistenza ai cicli di carica e scarica estremamente

PARTE I

Stato dell'arte

superiore. Il principale svantaggio di questa tecnologia è l'effetto memoria e l'alto valore di auto scarica.

Gli accumulatori elettrici basati su tecnologia agli ioni di litio stanno riscuotendo enorme successo nel campo della mobilità sostenibile date le loro caratteristiche di alta potenza specifica in relazione sia alla massa che al volume. Pur essendo una tecnologia ventennale, dimostra un largo margine di miglioramento sia al livello di prestazioni che al livello di costi di produzione. Rispetto alle tecnologie precedenti, le celle basate sul litio non soffrono del fenomeno di auto scarica (o ne soffrono in maniera marginale), non soffrono dell'effetto memoria e mantengono un'ottima prestazione anche se sottoposte a numerosi cicli di carica e scarica.

In ogni caso le tecnologie appena trattate sono state sviluppate in numerose varianti per performare in maniera ottimale nei vari settori di applicazione. Visto l'interesse crescente per la tecnologia al litio, e la maturità della tecnologia al piombo e nichel, in questo studio verranno analizzati gli accumulatori elettrochimici appartenenti ad ognuna delle tecnologie appena citate. Per le batterie agli ioni di litio è stata analizzata la cella con tecnologia LiFePO_4 , mentre per le batterie al piombo quelle con tecnologia Valve Regulated Lead Acid (VRLA) e Absorbent Glass Mat (AGM), per le celle che sfruttano il Nichel sono state analizzate delle celle Ni-Cd e Ni-MH.

1.4.1. Le Batterie a Base di Piombo

Le batterie al piombo sono il sistema elettrochimico di accumulo dell'energia più economico e più diffuso nelle applicazioni stazionarie, dimostrano invece degli svantaggi per tutte le applicazioni che necessitano di un'elevata potenza specifica, dettata dalla leggerezza o dalla necessità di un ridotto ingombro volumetrico. È una tecnologia matura che nel corso degli anni ha sperimentato una continua evoluzione per adattarsi al meglio ai vari processi che hanno subito un'elettrificazione. Per la trazione elettrica le batterie al piombo più utilizzate sono quelle con valvola di regolazione (VRLA).

1.4.1.1. L'elettrochimica della cella

Il catodo e l'anodo della cella contengono piombo in diverse forme e sono immersi in un elettrolita contenente H_2SO_4 . Nelle fasi di scarica, il catodo, che è formato da diossido di piombo (PbO_2), è convertito in solfato di piombo (PbSO_4) e contestualmente l'anodo, che inizialmente è piombo puro, viene convertito in solfato di piombo (PbSO_4). La reazione di ossido riduzione avviene perché l'acido solforico in cui sono immersi anodo e catodo non funge solo da elettrolita,

PARTE I

Stato dell'arte

e quindi conduttore di specie ioniche, ma prende anch'esso parte alla reazione, come riportato nello schema di reazione in Tabella 2 [83].

Tabella 2: Reazioni di Carica e Scarica nelle batterie a base di piombo

	Carica	↔	Scarica
Elettrodo positivo	$\text{PbO}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	↔	$\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
Elettrodo negativo	$\text{Pb} + \text{H}_2\text{SO}_4$	↔	$\text{PbSO}_4 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
Reazione cella	$\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$	↔	$2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

Di conseguenza l'equilibrio della cella dipende dalla concentrazione dell'acido. La concorrenza dell'elettrolita nel processo di reazione comporta che:

- la tensione a vuoto dipende dalla concentrazione di acido e la resistenza specifica dell'elettrolita e il suo punto di congelamento dipendono dallo stato di carica.
- Tra gli elettrodi deve essere presente una quantità sufficiente di acido, il che richiede una certa distanza tra gli elettrodi (maggiore ingombro e peso).

Durante il processo di scarica, gli ioni SO_4^{2-} vengono assorbiti da entrambi gli elettrodi (vedi schema di reazione), causando una diluizione dell'acido che compone l'elettrolita. Si noti che sull'elettrodo positivo si genera acqua, che comporta un'ulteriore diluizione dell'acido. Il consumo di acido sulla superficie e nei pori del materiale attivo comporta una riduzione del suo peso specifico in prossimità degli elettrodi [84]. La riduzione di peso specifico e la diluizione dell'acido provoca una stratificazione dell'acido stesso lungo tutta la superficie degli elettrodi, che risulta più concentrato nella parte inferiore della cella piuttosto che nella parte superiore, come mostrato in Figura 17.

PARTE I
Stato dell'arte

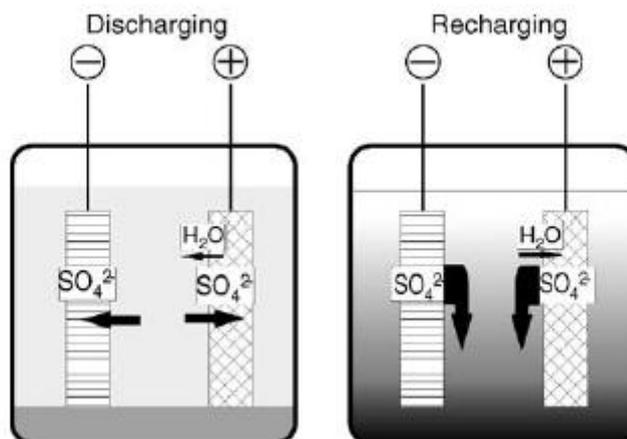


Figura 17: Evoluzione delle specie ioniche durante la fase di carica e scarica della cella al piombo acido [84]

Quando la batteria viene ricaricata, il processo inverso provoca un movimento verso il basso degli ioni SO_4^{2-} con il risultato che l'acido sul fondo diventa sempre più concentrato. Quando tali cicli di scarica/carica vengono ripetuti senza miscelazione dell'acido, l'acido in alto si diluisce sempre di più, mentre in basso la concentrazione può superare in modo significativo la concentrazione iniziale con la conseguenza che, nella parte superiore degli elettrodi, il materiale attivo viene utilizzato solo marginalmente, mentre è sovrautilizzato nella zona inferiore.

Pertanto, nella parte inferiore dell'elettrodo positivo si può verificare la disintegrazione del materiale attivo, mentre nell'elettrodo negativo è prevista la solfatazione del materiale attivo. Di conseguenza, le batterie piombo-acido allagate, utilizzate in applicazioni cicliche, devono essere regolarmente sovraccaricate per miscelare l'elettrolita attraverso una forte gassificazione, a meno che non siano dotate di agitazione forzata dell'acido. Le batterie VRLA non presentano questi inconvenienti, infatti l'elettrolita è contenuto all'interno di un separatore (AGM) che contrasta gli effetti della gravità. La presenza dell'AGM tra anodo e catodo fa sì che l'elettrolita sia mantenuto all'interno dei pori di quest'ultimo e non sia in grado di sperimentare il processo di stratificazione né l'effetto dovuto alla gravità, si possono però verificare anche delle reazioni secondarie che contribuiscono alla diminuzione delle performance della cella [85], [86].

1.4.1.2. Decomposizione dell'acqua

L'inevitabile decomposizione dell'acqua, formatasi sul catodo, avviene seguendo l'evoluzione chimica riportata in Tabella 3.

PARTE I

Stato dell'arte

Tabella 3: Decomposizione dell'acqua nella batterie a base di piombo

Evoluzione dell'ossigeno all'elettrodo positivo	$2\text{H}_2\text{O}$	\Rightarrow	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$
Evoluzione dell'idrogeno all'elettrodo negativo	$4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	\Rightarrow	2H_2
Decomposizione dell'acqua	$2\text{H}_2\text{O}$	\Rightarrow	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2$

L'evoluzione dell'ossigeno e dell'idrogeno sono reazioni secondarie sempre presenti anche se entrambe le reazioni sono estremamente ostacolate rispettivamente dal piombo in superficie (catodo) e del biossido di piombo (anodo). Questo fa sì che entrambe le reazioni secondarie siano così lente da non disturbare realmente il funzionamento della cella. Il principale svantaggio di queste due reazioni è una graduale auto-scarica della cella [83].

1.4.1.3. Riduzione dell'ossigeno

La riduzione dell'ossigeno è l'inverso dell'evoluzione dell'idrogeno, come mostrato in Tabella 4.

Tabella 4: Riduzione dell'ossigeno nelle batteria a base di piombo

Riduzione dell'ossigeno	$\text{O}_2 + \text{H}^+ + 4\text{e}^- \Rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
-------------------------	---

È una reazione rapida all'elettrodo negativo, tuttavia, il trasporto di ossigeno attraverso l'elettrolita liquido è un processo molto lento a causa della bassa velocità di diffusione e della solubilità limitata. Pertanto, la riduzione dell'ossigeno può essere trascurata nelle celle allagate. Nelle batterie VRLA, invece, l'ossigeno può raggiungere facilmente l'elettrodo negativo per diffusione rapida nella fase gassosa presente negli spazi vuoti all'interno dei pori più grandi dei separatori di vetro assorbente (AGM). Quasi tutto l'ossigeno generato sull'elettrodo positivo viene ridotto su quello negativo. L'evoluzione e la riduzione dell'ossigeno formano il ciclo interno dell'ossigeno, che costituisce la principale reazione secondaria nelle batterie VRLA. Poiché il potenziale di equilibrio della riduzione dell'ossigeno è pari a +1,23 V, questa reazione "depolarizza" l'elettrodo negativo, con il risultato che, nelle batterie VRLA, gli elettrodi negativi sono polarizzati solo per raggiungere un tasso di evoluzione dell'idrogeno che compensa il deficit di corrente all'elettrodo positivo causato dalla corrosione e dalla perdita di ossigeno. Il ciclo

PARTE I

Stato dell'arte

interno dell'ossigeno ha come effetto che la sovraccarica non si verifica più in modo indipendente sugli elettrodi positivi e negativi, poiché l'evoluzione e la riduzione dell'ossigeno sono collegate tra loro. Di conseguenza, l'aumento della tensione di carica aumenta principalmente l'ossigeno interno, e quasi nessuna corrente viene persa per compensare un eventuale deficit di carica dell'elettrodo negativo, a parte un piccolo contributo causato dall'incremento della corrosione correlato all'aumento del voltaggio di cella.

Questo comportamento di carica costituisce uno svantaggio delle batterie VRLA, poiché la capacità persa dell'elettrodo negativo non può essere recuperata con la normale ricarica. La ricarica completa dell'elettrodo negativo sarebbe possibile solo con un netto aumento della tensione di cella, poiché in tal caso viene superata la velocità massima del ciclo interno dell'ossigeno e la cella funziona in parte come una cella ventilata [87], [88].

1.4.1.4. Cicli di carica e scarica parziale

Le batterie VRLA possono essere “ciclate” in uno stato di carica parziale, poiché non si verifica la stratificazione dell'acido a causa dell'elettrolita immobilizzato. In tale applicazione, la polarizzazione degli elettrodi rimane solitamente molto bassa a causa dell'elevata velocità delle reazioni di carica. Questo significa anche che la velocità delle reazioni secondarie è piuttosto lenta e quindi può essere trascurata. Tuttavia, la questione di un possibile uso delle batterie al piombo-acido nei veicoli con propulsione ibrida richiede cicli a carichi estremamente elevati quando la batteria assiste l'accelerazione o recupera l'energia di frenata. In tali condizioni la polarizzazione degli elettrodi positivi e negativi può essere considerevole. Una notevole polarizzazione durante la ricarica, inoltre, significa che anche le reazioni secondarie avvengono a un ritmo considerevole e non possono più essere trascurate. L'alto numero di cicli, soprattutto in un ciclo urbano con molte soste, possono sommare i loro effetti e quindi degradare o danneggiare velocemente la batteria.

Un ampio studio è stato condotto dall' Advanced Lead-Acid Battery Consortium (ALABC) con l'obiettivo di simulare in maniera intensiva un tipico ciclo di carica e scarica delle batterie durante un utilizzo prettamente automobilistico. Esistono diversi parametri che influenzano “l'accettazione” della carica in un elettrodo, ad esempio la penetrazione della corrente all'interno dell'elettrodo potrebbe essere troppo bassa a carichi estremamente elevati, causando uno strato piuttosto denso di materiale “scaricato” vicino alla superficie [89]. Nel report dell'ALABC viene riportato l'andamento della tensione di cella ed il potenziale del singolo elettrodo quando la

PARTE I

Stato dell'arte

batteria è sottoposta ad alti *rate* di carica e scarica parziale. Al termine dello studio viene calcolata una generazione di idrogeno equivalente 26.4 mAs per ciclo, che viene perso come corrente di carica. L'ossigeno generato che rimane all'interno della cella raggiunge l'elettrodo provocando altri fenomeni di auto scarica. Considerando la scarica dovuta all'evoluzione dell'idrogeno e dell'ossigeno, la scarica dell'elettrodo negativo ammonta a 26.9 mAs per ciclo, quindi 7.5 mAh per ciclo. Se la condizione fosse mantenuta l'elettrodo avrebbe perso 7.5Ah ogni 1000 cicli, che nel caso della batteria in esame significa circa il 35% della capacità.

Pur dimostrando queste problematiche, soprattutto legate all'elevata perdita di capacità in applicazioni con carico estremamente variabile, questa tecnologia risulta essere considerabile nel trasporto pubblico. Il basso costo legato alla maturità della tecnologia può essere un vantaggio in confronto ad altre tecnologie. Inoltre, in applicazioni in cui l'ingombro ed il peso delle celle è relativo (mezzi di trasporto pesante) e in cui le prestazioni del mezzo non sono il focus principale del costruttore, un giusto dimensionamento del pacco batterie potrebbe limitarne l'uso intensivo e quindi rendere questa tecnologia una scelta appetibile.

1.4.2. Le Batterie a Base di Nichel

La batteria a base di nichel fu inventata da Waldemer Jungher nel 1899 e offre numerosi vantaggi rispetto la batteria piombo-acido. A causa dei costi elevati gli sviluppi furono all'inizio limitati, ma tra il 1932 e il 1947 furono introdotti notevoli miglioramenti (tra cui il deposito del materiale attivo su una piastra di nichel sinterizzato), che portarono alla moderna batteria Ni-Cd sigillata[90]. La struttura interna è costituita, nello stato di scarica completa, da un elettrodo positivo di idrossido di nichel (Ni(OH)_2) e da uno negativo di idrossido di cadmio (Cd(OH)_2). Quest'ultimo presenta fino al 25% di ferro e piccole quantità di nichel e grafite. All'elettrodo positivo è aggiunto invece dell'ossido di cobalto che forma un rivestimento elettricamente conduttivo sulla superficie dell'elettrodo. L'elettrolita è una soluzione acquosa costituita dal 20-30% di idrossido di potassio (KOH) e con un massimo del 2% di idrossido di litio (LiOH). Le reazioni di ossido riduzione che prendono parte negli elettrodi della cella sono riportate in Tabella 5 [91]:

PARTE I

Stato dell'arte

Tabella 5: Reazioni di Carica e Scarica nelle batterie a base di nichel

Elettrodo	Reazioni elettrochimiche		
Catodo	Ni(OH)_2	\Leftrightarrow	$\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + e^-$
Anodo	$\text{Cd(OH)}_2 + 2e^-$	\Leftrightarrow	$\text{Cd} + 2\text{OH}^-$
Generale	$\text{Cd} + 2\text{NiOOH} + 2\text{H}_2\text{O}$	\Leftrightarrow	$\text{Cd(OH)}_2 + 2\text{Ni(OH)}_2$

Rispetto alle batterie al piombo acido, le celle al Nichel-Cadmio risultano avere una resistenza meccanica e agli impatti superiore, elemento che le rende più versatili in un'ottica di trasporto e logistica. Le caratteristiche elettriche dipendono poco dallo stato di carica della batteria, nel senso che la resistenza interna si mantiene pressoché costante durante l'utilizzo. Questa tipologia di cella non risente del fenomeno del "deperimento a scaffale", quindi possono essere stoccate ed immagazzinate per molto tempo, con bassi rischi sia di manutenzione che per la sicurezza del deposito.

Di contro è una tecnologia più costosa rispetto alle celle a base di piombo, sue dirette concorrenti, a causa dei materiali utilizzati per gli elettrodi. Il cadmio, inoltre, risulta essere estremamente dannoso per l'ambiente: è necessario uno smaltimento adeguato e costoso. Il grande svantaggio operativo di questa tecnologia è l'effetto memoria, ossia la tendenza della batteria a dimostrare una depressione della tensione raggiunte le condizioni che si avevano nella ricarica precedente[92]. Praticamente, se si ricarica una batteria con uno stato di carica pari alla metà del suo potenziale, quando si riutilizzerà verrà letta scarica quando raggiungerà questo stato di carica. Si avrà quindi una caduta di tensione improvvisa ed un successivo ripristino alla tensione normale se l'esercizio viene prolungato. Tale caratteristica rende le celle a base di nichel poco adatte ad apparati che necessitano di potenze molto elevate, come veicoli elettrici. La Tabella 6 elenca i principali vantaggi e svantaggi della cella Ni-Cd [93].

PARTE I

Stato dell'arte

Tabella 6: Vantaggi e svantaggi delle celle Ni-Cd

Vantaggi	Svantaggi
Buone performance a basse temperature	Alto costo rispetto alle celle al piombo
Buone performance ad alti livelli di scarica	Alto valore di auto-scarica
Scarsa attività manutentiva	Effetto memoria elevato
Alto numero di cicli a fine vita	Problemi legati allo smaltimento del cadmio
Elevato periodo di conservazione	

La cella a base di nichel-metallo idruro è costituita da una tecnologia relativamente nuova con caratteristiche simili alla nichel-cadmio. La differenza principale è che la batteria al nichel-metallo idruro utilizza idrogeno, assorbito in una lega metallica, per il materiale negativo attivo invece del cadmio. L'elettrodo di idruro metallico ha una densità di energia più elevata rispetto all'elettrodo al cadmio. Pertanto, la quantità dell'elettrodo negativo utilizzato nella cella di nichel-metallo idruro può essere inferiore a quello utilizzato nella cella nichel-cadmio. Ciò consente un volume maggiore per l'elettrodo positivo, che si traduce in una maggiore capacità (quindi durata) per la batteria. Inoltre, poiché la batteria al nichel-metallo idruro è priva di cadmio, è considerata più ecologica, riducendosi i problemi associati allo smaltimento del cadmio. La maggior parte delle caratteristiche operative della batteria Ni-MH durante le fasi di scarica sono simili a quelle della batteria al nichel-cadmio. La nichel-metallo, tuttavia, non dimostra le alte capacità di scarica, soprattutto ad alti rate, della batteria al nichel-cadmio. Inoltre, il comportamento dei due sistemi in carica, in particolare sulla ricarica rapida, è diverso. La batteria al nichel-metallo idruro è meno tollerante al sovraccarico e richiede controllo della corrente di ricarica fino alla tensione di Cut-off, che potrebbe non essere sempre richiesto per le batterie al nichel-cadmio. Rispetto alle Ni-Cd, però, soffrono nettamente meno l'effetto memoria, dimostrano avere una capacità superiore (da due a tre volte considerando bassi rate di scarica) rispetto alla controparte al cadmio e sono più resistenti ai fenomeni di degrado [93], [94].

1.4.2.1. La cinetica chimica delle Ni-MH

Il metallo attivo dell'elettrodo positivo della batteria al nichel-metallo idruro, durante le fasi di ricarica, è l'ossidrossido di nichel. L'elemento attivo all'anodo, nelle fasi ricarica, è l'idrogeno sotto forma di idruro metallico. Questa lega metallica è in grado di subire una reazione reversibile di assorbimento-desorbimento dell'idrogeno mentre la batteria viene caricata e scaricata. L'elettrolita è invece principalmente composto da idrossido di potassio[95].

PARTE I

Stato dell'arte

Nelle celle sigillate viene utilizzata una quantità minima di elettrolita, con la maggior parte del liquido assorbito dal separatore e dagli elettrodi. Questa struttura "a elettrolita affamato", simile a quella delle celle al nichel-cadmio, facilita la diffusione dell'ossigeno all'elettrodo negativo alla fine della carica per la reazione di ricombinazione dell'ossigeno. Si tratta essenzialmente di una struttura a celle asciutte, permettendo così alla cella di funzionare in qualsiasi posizione, a differenza delle celle piombo senza separatore.

Durante la scarica, l'ossidrossido di nichel viene ridotto a idrossido di nichel mentre l'idruro metallico MH viene ossidato nella lega metallica M, come riportato in Tabella 7.

Tabella 7: Reazioni di Carica e Scarica nelle batterie Ni-MH

Elettrodo	Reazioni elettrochimiche		
Catodo	$\text{Ni(OH)}_2 + \text{OH}^-$	\rightleftharpoons	$\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$
Anodo	$\text{M} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$	\rightleftharpoons	$\text{MH} - \text{OH}^-$
Generale	$\text{MH} + \text{NiOOH}$	\rightleftharpoons	$\text{M} - \text{Ni(OH)}_2$

Le celle Ni-MH utilizzano un meccanismo di ricombinazione dell'ossigeno per prevenire l'accumulo di pressione che può derivare dalla generazione di gas verso la fine della carica o per sovraccarica. Si basa sull'uso di un elettrodo negativo (l'elettrodo di idruro metallico) che ha una capacità effettiva superiore a quella dell'elettrodo positivo o dell'ossidrossido di nichel [93]. Questo è illustrato schematicamente nella Figura 18.

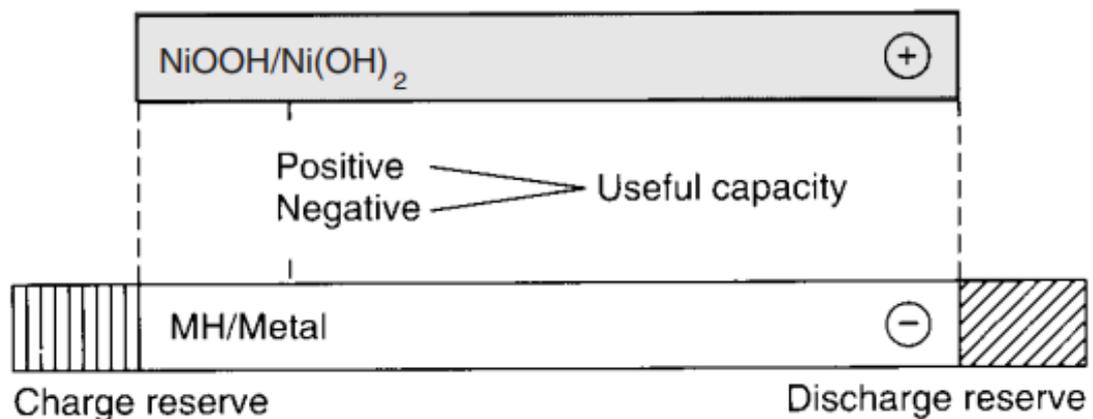


Figura 18: Rappresentazione schematica degli elettrodi delle celle Ni-MH[93]

PARTE I

Stato dell'arte

Durante la carica, l'elettrodo positivo raggiunge carica completa prima di quello negativo e inizia a produrre ossigeno, come mostrato in Tabella 8.

Tabella 8: Riduzione dell'ossigeno nelle batterie Ni-MH

Riduzione dell'ossigeno	$4MH + O_2 \Rightarrow 4M + 2H_2O$
-------------------------	------------------------------------

L'ossigeno gassoso si diffonde attraverso il separatore fino all'elettrodo negativo, diffusione facilitata dal *design* dell'elettrolita affamato e dalla scelta di un sistema di separazione appropriato. All'elettrodo negativo l'ossigeno reagisce con l'elettrodo di idrogeno, ossidandolo o scaricandolo, per produrre acqua. Inoltre, l'elettrodo negativo non si carica completamente, impedendo la generazione di idrogeno. La corrente di carica, tuttavia, deve essere controllata alla fine della carica e durante la sovraccarica per limitare la generazione di ossigeno al di sotto del tasso di ricombinazione per evitare l'accumulo di gas e di pressione. La Tabella 9 riporta i principali vantaggi e svantaggi delle batterie con tecnologia Nichel – Metallo idruro.

Tabella 9: Vantaggi e svantaggi delle celle Ni-MH [93]

Vantaggi	Svantaggi
Capacità superiore alle Nichel - Cadmio	Bassa capacità ad elevati C-rate
Assenza di Cadmio, basso impatto ambientale	Alto valore di auto-scarica
Ricarica rapida ammessa	Effetto memoria moderato
Alto numero di cicli a fine vita	Elettrodi negativi di costo più elevato
Elevato periodo di conservazione	

1.4.3. Le batterie agli ioni di litio

Le batterie ricaricabili agli ioni di litio sono degli accumulatori elettrochimici presenti non solo nei dispositivi elettronici portatili, ma anche in applicazioni che richiedono più energia, come ad esempio utensili, sistemi di back-up e veicoli elettrici ibridi. Nonostante il loro costo e le difficoltà nel reperimento delle materie prime e costruttive, rappresentano oggi il miglior compromesso per moltissime applicazioni rispetto ad altri tipi di accumulatori elettrochimici.

Gli accumulatori litio-ione (diffusamente indicati come batterie litio-ione) sono stati congegnati con l'intento di risolvere i problemi di ciclabilità e sicurezza dei sistemi al litio metallico pur mantenendo le caratteristiche di elevata energia[96]. L'aspetto che

PARTE I

Stato dell'arte

contraddistingue la batteria Li-ione da quella al litio è la sostituzione dell'anodo di litio metallico, spesso associato a problemi di sicurezza a causa della sua elevata reattività, con un elettrodo (detto a intercalazione) che sia in grado di accumulare e scambiare una quantità elevata di ioni litio [97]. L'elettrodo ad intercalazione viene accoppiato con un catodo formato da un materiale anche esso a intercalazione, che contiene litio nella sua struttura. In tal modo, al polo negativo avviene un processo di ossido-riduzione con inserimento ed estrazione di ioni litio (intercalazione e de-intercalazione), che vengono a loro volta forniti dal polo positivo. Il processo totale implica il trasferimento ciclico di una certa quantità di ioni litio tra i due elettrodi attraverso l'elettrolita all'interno della batteria, accompagnata dal flusso di elettroni nel circuito esterno collegato alla batteria (Figura 19). Questi sistemi si possono quindi configurare come celle a concentrazione dove gli ioni litio vengono trasferiti da un polo all'altro; da qui il termine accumulatore litio-ione. Viene in tal modo evitato ogni processo di deposizione-dissoluzione di litio metallico e ridotto considerevolmente il rischio di corto circuito per garantire affidabilità e sicurezza [98].

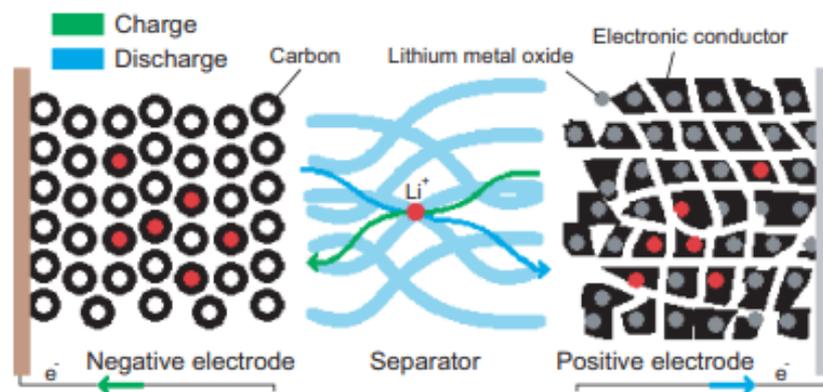


Figura 19: schema dell'intercalazione e de-intercalazione del Litio durante i processi di carica e scarica

Le reazioni di intercalazione degli ioni di litio, che permettono i fenomeni di carica e scarica della batteria, sono riportate in Tabella 10 nella sua forma più generica.

PARTE I

Stato dell'arte

Tabella 10: Reazioni di Carica e Scarica nella batterie a base di Litio

Elettrodo	Reazioni elettrochimiche		
Anodo	Li_yC_6^-	\Leftrightarrow	$y\text{Li}^+ + y\text{e}^- + 6\text{C}$
Catodo	$x\text{Li}^+ + x\text{e}^- + \text{Li}_{1-x}\text{MO}$	\Leftrightarrow	LiMO
Generale	$\text{Li}_y\text{C}_6^- + \text{Li}_{1-x}\text{MO}$	\Leftrightarrow	$\text{LiMO} + 6\text{C}$

La configurazione più utilizzata è quella basata sull'utilizzo di grafite applicata su un portacorrente di rame al polo negativo, e del biossido di Litio-Cobalto (LiCoO_2) applicato su un portacorrente di alluminio all'elettrodo positivo, entrambi materiali ad intercalazione, separati da un feltro imbevuto di elettrolita contenente ioni litio. Esistono comunque diverse tipologie di anodi, catodi ed elettroliti che concorrono a rendere una determinata cella più adeguata a certi scopi piuttosto che altri. L'immagazzinamento di energia della cella della batteria agli ioni di litio è normalmente limitato dal materiale dell'elettrodo positivo. Solitamente la carica specifica è maggiore nei materiali elettrodici negativi, come il carbonio (~350 mAh g⁻¹) rispetto, ad esempio, al litio-ferro-fosforo (Li_xFePO_4), materiali elettrodici positivi (<200 mAh g⁻¹). La tensione della cella è intrinsecamente elevata (3,5-4V) a causa dell'ampia differenza di potenziale tra gli elettrodi positivi e negativi anche se è limitata dalla finestra elettrochimica nella quale sia l'elettrolita che i materiali elettrodici sono stabili. Gli elettroliti liquidi organici comunemente utilizzati sono stabili tra circa 1/4V rispetto a Li/Li^+ [93], [99]–[101]. Questa finestra è più ampia se l'elettrodo negativo è al carbonio, poiché l'interfaccia passivante dell'elettrolita solido (SEI) si forma in modo irreversibile sul carbonio durante il ciclo. I materiali dell'elettrodo hanno anche una finestra di stabilità; sia il limite di potenziale superiore che quello inferiore sono limitati da reazioni collaterali. La reazione secondaria più nota è la placcatura al litio su elettrodi di carbonio al limite di basso potenziale, che viene evitata non caricando mai completamente il carbonio, utilizzando un eccesso di materiale di carbonio rispetto al materiale positivo dell'elettrodo durante la costruzione della cella.

1.4.3.1. Le batterie Litio Ferro Fosfato (LFP)

Tra i catodi ad elevata stabilità e basso costo viene annoverato il litio ferro fosfato (LiFePO_4 , o LFP) caratterizzato da una struttura a olivina (Figura 20). Nonostante il prolungatissimo ciclo di vita, questo materiale ha una tensione operativa relativamente bassa rispetto alle altre celle

PARTE I

Stato dell'arte

con tecnologia Li-ione (3.5 V di massimo). Tuttavia, il basso costo del materiale e l'elevata stabilità in cella lo rendono particolarmente adatto per applicazioni specifiche come l'accumulo stazionario di energia sostenibile, ad esempio da fonti rinnovabili, e l'utilizzo in autobus o mezzi di trasporto urbano elettrici [102].

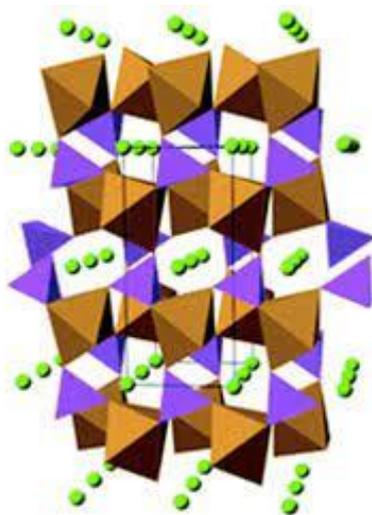


Figura 20: Struttura cristallina di LiFePO_4 , ottaedri di FeO_6 in marrone e tetraedri di PO_4 in viola, atomi di litio in verde [103]

Quando le batterie LFP si scaricano, le molecole di litio dell'elettrodo negativo si staccano dal grafene stratificato, trasformandosi in ioni di litio ed elettroni. Gli elettroni escono dalla cella attraverso il ponte di rame, mentre gli ioni di litio si muovono attraverso un separatore ed entrambi si integrano in fosfati di ferro nell'elettrodo positivo. Durante la carica, il litio si separa dal fosfato di ferro, generando ioni di litio ed elettroni. Gli ioni di litio e gli elettroni si trasferiscono all'elettrodo positivo e si integrano nella struttura del grafene. La reazione avviene da destra a sinistra. Le reazioni elettrochimiche sono illustrate in Tabella 11.

Tabella 11: Reazioni di Carica e Scarica nella batteria LiFePO_4

Elettrodo	Reazioni elettrochimiche		
Catodo	Li_nC_6	\Leftrightarrow	$\text{Li}_0\text{C}_6 + n\text{Li}^+ + n\text{e}^-$
Anodo	$\text{Li}_{m-n}\text{FePO}_4 + n\text{Li}^+ + n\text{e}^-$	\Leftrightarrow	Li_mFePO_4
Generale	$\text{Li}_n\text{C}_6 + \text{Li}_{m-n}\text{FePO}_4$	\Leftrightarrow	$\text{Li}_0\text{C}_6 + \text{Li}_m\text{FePO}_4$

PARTE I

Stato dell'arte

1.4.3.2. I fenomeni di degrado nella batteria al litio

L'invecchiamento delle batterie si basa su reazioni fisico-chimiche parassite che si verificano tra i vari componenti che la compongono: elettrodi, elettrolita, collettori di corrente, additivi. Queste reazioni degradano l'energia immagazzinabile (modificando la capacità) e la potenza massima (modificando l'impedenza) della batteria. Ogni meccanismo di invecchiamento può dipendere dalla temperatura, dallo stato di carica, dalla corrente o dall'azione sinergica di due o più grandezze. Alcuni meccanismi sono presenti nell'invecchiamento naturale, definito “*calendar aging*”, che si manifesta a circuito aperto, mentre altri sono attivati dai cicli, quindi a corrente non nulla [104], [105]. Va sottolineato che non solo il valore istantaneo di temperatura, stato di carica e corrente causano il degrado della batteria, ma anche le loro variazioni temporali possono influire sulla durata della batteria. Ad esempio, nelle campagne di test di invecchiamento riportate in [106][107], le batterie sono state sottoposte a carichi ciclici partendo da stati di carica differenti e raggiungendo profondità di scarica differenti. In questi due lavori è stata riscontrata un'importante influenza dell'ampiezza del ciclo di carica e scarica. Come sottolineato in [108], l'influenza del SOC sull'invecchiamento non è semplice da analizzare, perché in alcune situazioni i bassi livelli di SOC (alta DOD) possono essere vantaggiosi, mentre in altri casi potrebbero essere dannosi. Infine, una dipendenza non lineare del SOC dall'invecchiamento ciclico è stata identificata sperimentalmente in [109]. Sono stati eseguiti cinque test di cicli di carica e scarica alla stessa ampiezza ($\Delta\text{SOC} = 20\%$) a diversi livelli medi di SOC. Il ciclaggio a livelli molto bassi e molto alti di SOC (da 0% a 20% e da 80% a 100%) ha causato un degrado più rapido rispetto a quello valutato a livelli intermedi di SOC (da 20% a 40%, da 40% a 60% e da 60% a 80%).

Questi fenomeni si manifestano praticamente tramite la crescita dello strato di interfaccia elettrolita solido (SEI) sull'elettrodo negativo (grafite). La composizione dello strato SEI è molto complessa perché dipende dalla composizione dei solventi dell'elettrolita e degli additivi dell'elettrodo, rendendolo di fatto un meccanismo di reazione multipla. La formazione di SEI è accelerata ad alti livelli di temperatura e di stato di carica. In funzione della composizione dell'elettrodo positivo, la crescita di SEI può essere accelerata da altri meccanismi, in particolare la dissoluzione e la migrazione di manganese o ferro ad alti livelli di T e SOC [103], [104], [110].

Il meccanismo di invecchiamento ciclico più rappresentativo è la placcatura del litio sull'elettrodo negativo (grafite). Questo meccanismo consiste in una limitazione della diffusione dell'inserimento del litio quando la batteria viene caricata ad alte velocità di corrente o a basse temperature. In queste condizioni, il litio può essere depositato sull'elettrodo negativo invece di

essere inserito nella grafite. Altri meccanismi di invecchiamento ciclico nelle batterie agli ioni di litio sono, ad esempio, il cracking delle particelle e la corrosione dei collettori. Tuttavia, questo tipo di meccanismi si verifica soprattutto in condizioni d'uso estreme, con tassi di corrente molto elevate o scariche molto profonde, e non in condizioni d'uso normali [110] .

1.5. La modellazione delle batterie

In letteratura esistono diversi modelli matematici che simulano il comportamento delle batterie quando soggette a carichi elettrici e a fenomeni esterni. I modelli si possono raccogliere in quattro classi: modello empirico, modello del circuito equivalente, modello elettrochimico e data-driven model [111].

1.5.1. Modello del Circuito Equivalente

Il Modello di Circuito Equivalente (ECM) descrive la tensione ai capi della batteria come funzione della corrente di carica/scarica e del SOC. Per ottenere l'obiettivo, questo modello utilizza componenti elettrici attivi (condensatori) o passivi (resistenze) collegati in modo da definire la tensione ai capi del generatore di tensione. Il vantaggio di questo tipo di modellazione è la facilità di modellazione matematica e la conseguente semplicità nell'implementazione del modello all'interno di sistemi di controllo e monitoraggio della batteria. Inoltre, l'utilizzo combinato dei componenti elettrici che lo compongono, permette di descrivere la variazione della tensione della batteria nel transitorio di corrente. La sua semplicità, il numero esiguo di variabili da modificare e la sua immediata implementazione fanno sì che sia il modello più utilizzato nella progettazione dei Battery Management System (BMS) [111].

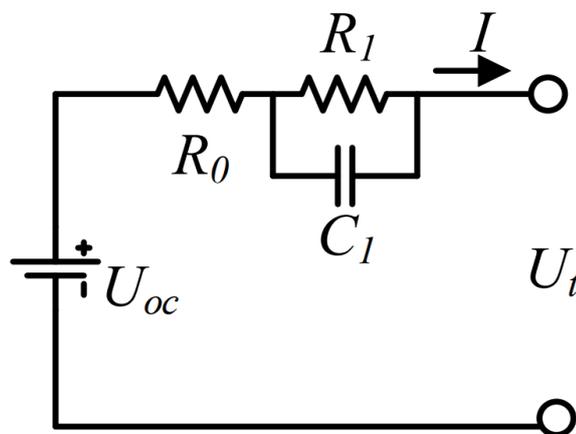


Figura 21: Equivalent Circuit Model secondo le approssimazioni di Thevenin[112]

PARTE I

Stato dell'arte

A causa della loro semplicità però gli ECM non riescono a descrivere completamente il comportamento della batteria nel lungo termine. Non considerando infatti la fisica della batteria, o i fenomeni di cinetica chimica coinvolti durante il suo utilizzo, non si riesce a descrivere il corretto comportamento della batteria a temperatura diverse da quelle nominali o non si riescono a descrivere i fenomeni di invecchiamento e perdita di capacità della batteria. In Figura 21 è mostrato un tipico esempio di ECM, in cui la tensione ai capi della batteria è definita dall'equazione (1.35).

$$U_t = U_{OC} - U_1 - I \cdot R_0 \quad (1.35)$$

In cui U_1 rappresenta la caduta di tensione ai capi del ramo RC, che vede connessi in parallelo la resistenza di polarizzazione R_1 e la capacità di polarizzazione C_1 , mentre U_{oc} è la tensione di circuito aperto della batteria, funzione del SOC.

1.5.2. Data Driven Model

I modelli basati sui dati non considerano un vero e proprio modello matematico della batteria, ma per questi modelli la batteria è considerata come una *black box*. Generalmente la funzione di risposta della batteria viene valutata tramite l'addestramento e la validazione di reti neurali. Per ottenere dai dati affidabili è necessario disporre di una enorme quantità di dati sulla batteria da modellare per l'addestramento della rete e la sua validazione, questo può comportare un enorme dispendio di tempo e di risorse. Inoltre, a causa dell'impossibilità di controllare le equazioni che legano i nodi della rete, non è raccomandato l'utilizzo in applicazioni che prevedono un alto grado di sicurezza e facile implementazione [113], [114].

1.5.3. Modello Elettrochimico

I modelli elettrochimici sono stati sviluppati per superare i problemi dimostrati dagli ECM. Questi modelli considerano anche la parte chimico-fisica della batteria nella modellazione matematica, e simulando cioè le reazioni chimiche che coinvolgono l'elettrolita e gli elettrodi. Quasi tutti i modelli in letteratura derivano dal modello DFN (Doyle, Fuller e Newman), basato sulla teoria dell'elettrodo poroso e delle soluzioni concentrate. I modelli elettrochimici richiedono un numero importante di parametri da conoscere prima di condurre le simulazioni. Infatti, le equazioni presuppongono una profonda conoscenza della struttura chimica della batteria, come la conduttività dei materiali e la loro composizione chimica. Questi parametri

serviranno per la risoluzione delle equazioni differenziali, non lineari ed accoppiate, che simulano il comportamento della batteria. Quindi, seppur molto affidabili riguardo la risposta fisica del modello, risultano comunque inadeguati nei contesti che richiedono un'implementazione a basso costo computazionale o per applicazioni real-time [115], [116]

1.5.4.1 Modelli Empirici

Nei modelli empirici, il voltaggio ai capi della batteria è definito tramite delle funzioni matematiche dipendenti dallo stato di carica della batteria e della corrente. Le funzioni che descrivono questa relazione sono delle equazioni polinomiali, che generalmente non superano il secondo ordine, che riescono a definire anche il comportamento non lineare della batteria. Tra i modelli empirici, i più comuni sono quello proposto da Shepherd, il modello universale di Unnewehr ed il modello di Nernst, riportati in Tabella 12.

Tabella 12: Modelli empirici più diffusi

Modello	Equazione
Shepherd Model	$y_k = E_0 - Ri_k - \frac{K_1}{z_k}$
Unnewehr Universal Model	$y_k = E_0 - Ri_k - K_1 z_k$
Nernst Model	$Y_k = E_0 - Ri_k - K_2 \ln(z_k) + K_3 \ln(1 - z_k)$

Tutti i modelli possono aumentare l'accuratezza nel descrivere il funzionamento della batteria aggiungendo dei parametri, questo li rende molto versatili e molto utilizzati in ambito di ricerca e sviluppo.

1.5.4.1. Il Modello di Shepherd

Nel Modello di Shepherd l'equazione matematica che descrive l'evoluzione della tensione della batteria è formata da due contributi, cioè la tensione a circuito aperto e la resistenza di interna, come descritto nell'equazione (1.36) e (1.37).

$$V_{Batt}(t) = E_0 - \frac{KQ}{Q-i.t} i(t) - Ri(t) \quad (1.36)$$

$$OCV(t) = E_0 - \frac{KQ}{Q-i.t} \quad (1.37)$$

dove E_0 è la tensione di circuito aperto quando la batteria in esame risulta essere pienamente carica (V), Q è la capacità massima (Ah), $i.t$ la capacità istantanea, K la resistenza di

PARTE I

Stato dell'arte

polarizzazione (Ω) e R la resistenza interna (Ω). Il secondo termine, nell'equazione (1.36), è associato alla perdita di tensione ohmica di polarizzazione mentre l'ultimo termine rappresenta la perdite interne alla batteria. Il termine OCV(t) rappresenta l'evoluzione della tensione di circuito aperto al variare dello stato di carica.

1.5.4.2. Il Modello di Shepherd Modificato

Come per gli altri modelli empirici, anche nel modello di Shepherd è possibile aggiungere termini nelle equazioni che lo descrivono per migliorarne l'accuratezza nella descrizione dell'evoluzione della tensione di cella [117]. Tremblay et al [118] hanno proposto una modifica al modello di Shepherd per risolvere dei loop algebrici e delle instabilità quando utilizzato in ambienti simulativi. Il modello di Shepherd non considera i fenomeni di isteresi della tensione che si presentano per alcune tecnologie durante la fase di scarica e di carica. Per questo motivo per la modellazione delle batterie è stato utilizzato il modello di Shepherd modificato, con delle funzioni modificate e validate appositamente per le celle basate sul piombo, nichel e litio.

1.5.4.3. Il modello di Shepherd modificato per le batterie a base di litio

Al modello di Shepherd classico è stato aggiunto il termine che rappresenta la polarizzazione della tensione, per rappresentare meglio l'effetto dello SOC sulla tensione di circuito aperto della batteria. Inoltre, per migliorare la simulazione della dinamica della batteria, la corrente della batteria viene ritardata tramite un filtro passa basso per tenere conto della resistenza di polarizzazione [118], [119]. Per le celle con tecnologia al litio, la tensione della batteria è espressa tramite l'equazione (1.38) [119].

$$V_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} \cdot it - R \cdot i + A_B \exp(-B \cdot it) - K \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - C \cdot it \quad (1.38)$$

dove E_0 è la tensione termodinamica della batteria (V), K è la costante di polarizzazione (V/Ah), Q è la capacità della batteria (Ah), i^* è la corrente della batteria filtrata (A), it è la carica effettiva della batteria (Ah), A_B è l'ampiezza della zona esponenziale (V), B è la costante di tempo della zona esponenziale inversa (Ah^{-1}), C è la pendenza della tensione di polarizzazione (V/Ah) e R è la resistenza interna (Ω). L'equazione (1.38) è valida per $\text{SOC} \in]0\%, 100\%[$. Tuttavia, allo 0% SOC e SOC al 100% (dove $Q=it$), l'equazione (1.38) viene modificata rispettivamente nelle equazioni (1.39) e (1.40).

PARTE I
Stato dell'arte

$$V_{batt} = V_{cutoff} \quad (1.39)$$

$$V_{batt} = V_{full} \quad (1.40)$$

dove V_{cutoff} e V_{full} sono rispettivamente le tensioni di batteria completamente scarica e di batteria completamente carica, valori solitamente forniti dal costruttore. L'utilizzo della corrente filtrata nell'equazione (1.38) permette la modellazione numerica dei fenomeni di isteresi ed inerziali che coinvolgono la batteria. Questa è espressa tramite l'equazione (1.41).

$$i^*(t) = L^{-1} \left(\frac{1}{1+s \cdot T_d} \cdot I(s) \right) \quad (1.41)$$

dove $I(s)$ è la trasformata di Laplace della corrente della batteria (A) e T_d è il tempo di risposta della batteria. Si noti che il termine $K(Q/Q-it) \cdot it$ dell'equazione (1.38) è indicato come tensione di polarizzazione mentre il termine $K(Q/Q-it)$ è la resistenza di polarizzazione (Pol_{res}). Per simulare il comportamento, solitamente differente, della batteria durante le fasi di carica e scarica, la resistenza di polarizzazione assume la forma dell'equazione (1.42) durante le fasi di ricarica.

$$Pol_{res} = K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \quad (1.42)$$

1.5.4.4. Il modello di Shepherd modificato per le batterie al piombo

Le batterie al piombo manifestano un fenomeno di isteresi tra carica e scarica, che si verifica solo nella zona esponenziale della curva di tensione a vuoto, cioè in prossimità della piena carica della cella. Per rappresentare questo fenomeno si può utilizzare una funzione del secondo ordine. La (1.38) viene quindi modificata, diventando la (1.43) per la carica, e la (1.44) per la scarica.

PARTE I

Stato dell'arte

$$V_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} \cdot it - R \cdot i + Exp(t) - K \frac{Q}{it-0.1Q} \cdot i^* - C \cdot it \quad (1.43)$$

$$V_{batt} = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} \cdot it - R \cdot i + Exp(t) - K \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - C \cdot it \quad (1.44)$$

In cui il termine $Exp(t)$ rappresenta la zona di tensione esponenziale, che dipende dallo stato di carica iniziale e se la batteria è sottoposta a processi di carica o di scarica. Vale infatti la relazione (1.45).

$$\dot{Exp}(t) = B \cdot |i(t)| \cdot (-Exp(t) + A \cdot u(t)) \quad (1.45)$$

In cui $u(t)$ è pari ad 1 in fase di carica e pari a 0 durante la scarica.

1.5.4.5. Il modello di Shepherd modificato per le batterie al nichel

Il comportamento delle batteria a base di nichel è analogo a quello delle batteria a base di piombo. Il loro comportamento viene quindi modellato tramite le equazioni (1.43-1.45). Per rappresentare i fenomeni, già discussi, riguardo la sovraccarica delle batterie basate sul nichel, viene modificata la resistenza di polarizzazione valutando la it in valore assoluto. Quindi l'equazione (1.42) diventa l'equazione (1.46).

$$Pol_{res} = K \frac{Q}{|it|-0.1 \cdot Q} \quad (1.46)$$

1.5.5. Il Modello di Aging della Batteria

Tutte le batterie sono sottoposte, a causa di fenomeni diversi, ad un processo di invecchiamento dopo un certo periodo di utilizzo. A prescindere dalla tecnologia, i fenomeni di invecchiamento sono correlati ai carichi elettrici a cui sono sottoposte durante l'esercizio, sia in ampiezza che in frequenza, alle temperature a cui operano e al valore medio della profondità di scarica. L'effetto dell'invecchiamento nelle celle si presenta come una diminuzione della capacità della batteria e con un aumento della resistenza interna.

Poiché l'invecchiamento modifica la capacità della batteria, e quindi la quantità carica elettrica accumulabile ed erogabile durante il suo funzionamento, è necessario sviluppare un modello

PARTE I

Stato dell'arte

matematico in grado di stimare l'invecchiamento della batterie e valutare le variazioni prestazionali causate dal fenomeno.

In letteratura sono stati proposti diversi modelli che cercano di emulare gli effetti dell'invecchiamento della batteria, partendo dalle modifiche strutturali degli elettrodi, simulando ad esempio l'evoluzione del SEI all'interno della cella a base di litio, o sviluppando modelli matematici che "mappano" i fenomeni di aging dopo una lunga campagna sperimentale [30-34],[120]–[124]. In questo lavoro ci si è affidati al modello matematico sviluppato da Motapon et al. [125] in quanto risulta essere facilmente implementabile all'interno di una centralina e necessita di un numero limitato di prove sperimentali per il calcolo delle variabili necessarie alla valutazione dei fenomeni. Motapon et al. [125] hanno legato la profondità di scarica, valore medio delle correnti di scarica, valore medio delle correnti di ricarica e temperatura ai fenomeni di degrado della batteria. A ognuno di questi quattro elementi viene associato un fattore di stress che quantifica l'effettiva influenza della grandezza sul degrado complessivo della cella. Il concetto che sta alla base del modello è quello di equiparare la batteria ad un materiale sottoposto a carichi ciclici; le equazioni che definiscono il modello hanno una natura molto simile alla teoria che sta alla base della fatica dei materiali.

Il numero di cicli della batteria viene valutato monitorando lo stato di carica della batteria ad ogni istante di tempo. Considerando un intervallo di tempo Δt , la variazione di SOC (ΔSOC) associata ad ogni istante di tempo è definita tramite l'equazione (1.47)

$$\Delta SOC(k) = SOC(k) - SOC(k - 1) \quad (1.47)$$

Essendo $SOC(k)$ lo stato di carica della batteria per ogni istante k con $k=1,2,3\dots$

Il segno di $\Delta SOC(k)$ diverso dal segno di $\Delta SOC(k-1)$ indica una variazione di funzionamento della batteria (da carica a scarica o viceversa). La variazione di segno tra $\Delta SOC(k)$ e $\Delta SOC(k-1)$ sancisce quindi una transizione di funzionamento, che la batteria ha sperimentato per un intervallo di tempo finito pari a $\Delta t \cdot k$. Per convenzione, viene indicato con "a" il numero di campioni k in cui la cella è stata sottoposta ad un tipo di carico, e con " a_{prev} " il numero di campioni in cui la batteria è stata sottoposta al carico precedente. La transizione del segno da negativo a positivo del ΔSOC indica l'inizio della fase di carica. Quindi, la corrente media di scarica appena sperimentata può essere valutata tramite l'equazione (1.48).

PARTE I

Stato dell'arte

$$I_{discharge_{avg}}(n) = \frac{1}{M} \sum_{k=a_{prev}}^{a-1} |I_{BATT}(k)| \quad (1.48)$$

Mentre la corrente media di carica verrà considerata tramite la (1.49)

$$I_{charge_{avg}}(n) = I_{charge_{avg}}(n - 1) \quad (1.49)$$

Se il ΔSOC varia da positivo a negativo si otterrà il caso duale, quindi la corrente media di carica e di scarica verranno considerate rispettivamente tramite le equazioni (1.50) e (1.51)

$$I_{charge_{avg}}(n) = \frac{1}{M} \sum_{k=a_{prev}}^{a-1} |I_{BATT}(k)| \quad (1.50)$$

$$I_{discharge_{avg}}(n) = I_{discharge_{avg}}(n - 1) \quad (1.51)$$

Nelle equazioni (1.48) e (1.50), il parametro M rappresenta la differenza tra il numero di campioni valutato durante il mantenimento dello stato corrente (a) ed il numero di campioni valutato nello stato precedente (a_{prev}).

Per ogni ciclo di scarica e carica, quindi, la batteria sarà sottoposta ad una corrente media di scarica e di carica secondo le equazioni appena descritte. Immaginando che la batteria abbia iniziato e terminato il ciclo allo stesso valore di SOC, è possibile definire per ogni ciclo n anche il valore di DOD(n). Riprendendo la teoria del Miner sul danno cumulato per ogni ciclo dal materiale, è possibile riportare la stessa teoria sulla batterie considerando, invece del carico a cui è sottoposto il materiale, l'influenza del DOD e delle correnti, definendo quindi il fattore di stress corrispondente [126].

Per la profondità di scarica, è possibile valutare il fattore di stress θ_{DOD} per ogni ciclo tramite l'equazione (1.52)

$$\theta_{DOD(n)} = \left(\frac{DOD(n)}{DOD_{ref}} \right)^{1/\rho} \quad (1.52)$$

PARTE I

Stato dell'arte

Dove DOD_{ref} è pari a 100% e ρ è l'esponente di stress legato alla profondità di scarica. In maniera analoga viene valutato anche l'impatto del C-rate di carica e scarica tramite le equazioni (1.53) e (1.54) rispettivamente.

$$\theta_{I_{Charge}(n)} = \left(\frac{I_{Chargeavg}(n)}{I_{Chargeref}} \right)^{\frac{1}{\gamma_1}} \quad (1.53)$$

$$\theta_{I_{Discharge}(n)} = \left(\frac{I_{Dischargeavg}(n)}{I_{Dischargeref}} \right)^{\frac{1}{\gamma_2}} \quad (1.54)$$

In cui $I_{Chargeref}$ ed $I_{Dischref}$ rappresentano le correnti di stress di riferimento per la batteria, rispettivamente in carica e scarica, definite dal costruttore o da prove sperimentali. Anche lo stress legato alla temperatura può essere considerato facendo riferimento all'equazione (1.55) [127].

$$\theta_{T(n)} = \exp \left[-\varphi \left(\frac{1}{T_a(n)} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (1.55)$$

Dove $T_{a(n)}$ e T_{ref} sono la temperatura di esercizio e la temperatura di riferimento per l'uso della batteria, mentre φ è la costante di Arrhenius valutata sperimentalmente.

Il prodotto di tutti i fattori di stress è pari allo stress effettivamente sperimentato dalla batteria per ogni ciclo. Il numero massimo di cicli, N_c , al fine vita è inversamente proporzionale al fattore di stress risultante, come riportato nell'equazione (1.56).

$$N_c(n) = \frac{N_{Cref}}{\theta(n)} \quad (1.56)$$

Essendo N_{Cref} il numero di cicli a fine vita della batteria quando sottoposta a cicli di carica e scarica con valore di $DOD=DOD_{ref}$, $I_{charge}=I_{ChargeRef}$, $I_{Disch}=I_{DischRef}$ e $T_a=T_{ref}$. $\Theta(n)$, invece, rappresenta il prodotto dei fattori di stress, ed è valutato nell'equazione (1.57).

$$\theta(n) = \theta_{DOD(n)} \cdot \theta_{I_{Charge}(n)} \cdot \theta_{I_{Discharge}(n)} \cdot \theta_{T(n)} \quad (1.57)$$

PARTE I

Stato dell'arte

In profili di carico di esercizio comune, è improbabile che la batteria a fine o all'inizio di ogni ciclo si trovi nelle stesse condizioni di carica del ciclo precedente. È quindi opportuno considerare il numero di cicli equivalente effettuato dalla batteria. Questa grandezza può essere valutata tramite l'equazione (1.58).

$$N_{eq}(n) = 0.5 \left(2 - \frac{DOD(n-2)+DOD(n)}{DOD(n-1)} \right) \quad (1.58)$$

Tramite la (1.58) si prende come riferimento la scarica e la carica parziale di ogni ciclo rispetto ad una carica o scarica completa.

È quindi il rapporto tra il numero di cicli a fine vita, N_c , ed il numero di cicli equivalenti, N_{eq} , che quantifica il degrado della cella per ogni ciclo. Chiaramente, all'aumentare dei cicli, l'indice valuterà anche il degrado cumulato fino a quel momento. L'equazione (1.59) esprime l'indice di degrado cumulato.

$$\epsilon(n) = \epsilon(n-1) + \frac{N_{eq}(n)}{N_c(n-1)} \quad (1.59)$$

Secondo il modello considerato, l'indice di degrado non è altro che il rapporto il degrado cumulato ed il numero di cicli a fine vita, che è posto pari al rapporto tra la capacità istantanea e la capacità a fine vita, così come la resistenza istantanea e quella a fine vita, come espresso dalla (1.60) e dalla (1.61)

$$Q(n) = Q_{BOL} - \epsilon(n)^\alpha \cdot (Q_{BOL} - Q_{EOL}) \quad (1.60)$$

$$R(n) = R_{BOL} - \epsilon(n)^\beta \cdot (R_{BOL} - R_{EOL}) \quad (1.61)$$

Dove Q_{BOL} e Q_{EOL} rappresentano la capacità della batteria rispettivamente non degradata ed a fine vita. Analogamente, R_{BOL} e R_{EOL} rappresentano la resistenza della batteria non degradata ed a fine vita. Gli esponenti α e β sono tipici della cella e sono dei coefficienti di correzione delle equazioni utilizzati per correlare i dati sperimentali con quelli numerici. Convenzionalmente Q_{EOL} è posto pari all'80% di Q_{BOL} , mentre R_{EOL} è pari a 1.2 volte R_{BOL} , anche se possono essere posti dei valori più cautelativi o meno stringenti in funzione delle applicazioni.

I valori di α e β , così come i valori di ρ , γ_1 , γ_2 e φ vengono calcolati eseguendo dei test specifici in laboratorio in cui viene degradata la batteria in condizioni di carico controllate.

1.6. Energy Management System e Metodi di Ottimizzazione.

I compiti svolti dal sistema di controllo di un veicolo ibrido possono essere raggruppati in due sottocategorie: il primo compito è il controllo a basso livello dei componenti, in cui ogni componente del gruppo propulsore viene gestito utilizzando i classici metodi di controllo di attuazione a retroazione. Il secondo compito, definito controllo di alto livello o controllo di supervisione, è responsabile dell'ottimizzazione del flusso di energia a bordo del veicolo, definendo le strategie operative e i comandi di attuazione per il controllo a basso livello. Questo livello di controllo, chiamato Energy Management System (EMS), riceve ed elabora le informazioni provenienti dal veicolo (come velocità propulsori, livello di carica della batteria) e dal guidatore (come stato acceleratore e freno) per definire il modo operativo da imporre al veicolo (come trazione elettrica, trazione ibrida). Definito il modo operativo, il controllo di basso livello imporrà i segnali di comando ai componenti della trasmissione.

È pratica sempre più diffusa quella di sviluppare degli algoritmi di gestione energetica i cui parametri di controllo siano ottimizzati per ottenere una determinata funzione obiettivo. La decisione su cosa considerare ottimale dipende dall'applicazione specifica: nella maggior parte dei casi, le strategie tendono a minimizzare il consumo di carburante, ma gli obiettivi di ottimizzazione possono includere anche la minimizzazione delle emissioni di inquinanti, la massimizzazione della durata della batteria o, in generale, un compromesso tra diversi obiettivi.

In letteratura sono state proposte diverse famiglie di strategie di gestione dell'energia. Si possono individuare due tendenze generali che affrontano il problema della gestione energetica:

- 1) i metodi basati su regole (Rule-Based)
- 2) i metodi basati su algoritmi di ottimizzazione (Optimization-Based).

Come già accennato nell'introduzione allo studio, i controlli Rule-Based gestiscono i fornitori di potenza attuando delle regole fisse definite durante la progettazione del sistema di controllo. I Rule-based più evoluti si basano sulla gestione energetica *multi-mode*, in cui le regole di gestione energetica sono complesse e prevedono diversi modi operativi per il veicolo, nonostante riescano ad essere facilmente implementate in hardware specifici per il settore *automotive*. Di contro, rilasciati i parametri di controllo, il loro funzionamento è definito e prescinde dalla

PARTE I

Stato dell'arte

missione che svolge il veicolo che gestiscono. Nei controlli Optimization Based, l'obiettivo dell'EMS è quello di ottenere l'ottimo globale minimizzando una funzione di costo che, nel caso degli HEV, solitamente è il consumo di combustibile o l'emissione di un agente inquinante. Queste funzioni per poter funzionare devono ricevere come input un determinato ciclo di guida, oltre a considerare i vincoli fisici di ICE, ESS ed EM; ciò rende l'approccio al controllo non casuale, e difficilmente implementabile in un hardware fisico.

Un problema di ottimizzazione matematica assume la forma generale:

$$\min_{x \in X} f(x) \quad (1.62)$$

Dove

- $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ è la funzione obiettivo
- $X \subseteq \mathbb{R}^n$ è l'insieme ammissibile delle soluzioni

Nei problemi vincolati risulta $X \subset \mathbb{R}^n$, in quelli non vincolati si ha $X = \mathbb{R}^n$. Non è necessariamente vero che l'espressione analitica della funzione obiettivo e/o dei vincoli sia nota, soprattutto quando si ha una non definita o complessa correlazione tra le variabili ed i vincoli che definiscono la funzione. In contesti come quello oggetto di studio, non è raro che le grandezze necessarie al processo di ottimizzazione vengono calcolate mediante simulazioni ripetute, coinvolgendo anche risultati provenienti da software differenti o da sistemi chiusi. I dati così ottenuti vengono poi ulteriormente processati per calcolare la funzione obiettivo e/o i vincoli. In contesti del genere, l'applicazione di metodo di ottimizzazione che coinvolgano l'utilizzo di funzioni complesse, come le derivate, possono portare a valutazioni errate e all'utilizzo di grandi risorse computazionali. L'interesse applicativo ha motivato quindi lo sviluppo di metodi di ottimizzazione che non richiedano la conoscenza delle derivate. Tra questi metodi, i più diffusi sono:

- 1) Metodi alle differenze finite: L'idea alla base dei metodi di questa classe è di approssimare, ad ogni iterazione k , le componenti del gradiente con formule alle differenze in avanti del tipo espresso nell'equazione (1.63)

PARTE I

Stato dell'arte

$$\tilde{\nabla}_j f(x_k) = \frac{f(x_k + h_j e_j) - f(x_k)}{h_j} \quad (1.63)$$

in cui h_j è il passo di discretizzazione ed e_j rappresenta il j – esimo asse coordinato. Il gradiente così approssimato può essere utilizzato all'interno di efficienti metodi standard di ottimizzazione, quali metodi quasi-Newton o di tipo gradiente coniugato.

- 2) Metodi di modellizzazione: Questi metodi si basano sull'idea di definire un modello analitico della funzione obiettivo, che può essere lineare o quadratico, e di applicare a questo modello una tecnica di minimizzazione che utilizzi informazioni sulle derivate [128] [129] [130]. In particolare, il modello utilizzato è della forma espressa nell'equazione (1.64)

$$m_k(x_k + s) = f(x_k) + g_k^T s + \frac{1}{2} s^T H_k s \quad (1.64)$$

Dove $g_k \in \mathcal{R}^n$, $H_k \in \mathcal{R}^{n \times n}$ sono tali che il modello $m_k(x_k + s)$ è un interpolante della funzione su un opportuno insieme di punti Y che viene aggiornato durante l'avanzare dell'algoritmo. Si ha quindi la relazione dell'equazione (1.65)

$$m_k(y) = f(y), \quad \forall y \in Y \quad (1.65)$$

Il modello $m_k(x_k + s)$ viene minimizzato all'interno di una sfera centrata nel punto corrente di raggio Δ_k , dove Δ_k rappresenta una stima del raggio della regione in cui il modello è affidabile. Sul punto prodotto dalla minimizzazione viene valutata la funzione obiettivo reale, $f(x)$, e in base al valore ottenuto si aggiorna l'insieme di punti Y e il raggio della sfera Δ_k . Nella definizione e nell'aggiornamento dell'insieme Y , si deve far sì che i punti $y \in Y$ soddisfino delle relazioni geometriche che garantiscano che Y sia tale da rappresentare adeguatamente la funzione obiettivo nell'intorno del punto corrente.

- 3) Metodi di ricerca diretta: Con il nome di metodi di ricerca diretta (“*direct search*”) si indica un insieme di metodi accomunati dall'idea di basare la minimizzazione sul confronto diretto dei valori della funzione obiettivo nei punti generati dall'algoritmo. All'interno di questa classe di metodi si trovano algoritmi euristici, che non hanno cioè proprietà teoriche,

PARTE I

Stato dell'arte

e algoritmi per cui invece si può dimostrare la convergenza a punti stazionari. In particolare, si possono distinguere tre classi di metodi di ricerca diretta:

- a. Metodi di tipo semplice;
- b. Metodi di tipo Pattern Search (PSM);
- c. Metodi di tipo Line Search (LSM).

Tra questi, i metodi Pattern Search hanno riscosso un notevole successo nei processi di simulazione e ottimizzazione simili a quelli proposti in questo studio. I metodi sono vantaggiosi perché hanno come caratteristica principale la convergenza globale, il che significa che non generano ristagno nei minimi locali, poiché presentano una ricerca esaustiva in tutto l'intervallo dei valori ammissibili. I PSM presentano l'indubbio vantaggio di poter essere implementati con semplici operazioni matematiche, consentendo una codifica relativamente facile per gli hardware. Per questo motivo verranno approfonditi ed utilizzati come metodo di ottimizzazione.

1.6.1 I Metodi Pattern Search.

I PSM appartengono ad una famiglia di algoritmi ideati nel 1979. Sostanzialmente sono costituiti da operazioni matematiche che calcolano una sequenza di valori che si avvicinano all'ottimo per la funzione obiettivo [131][132]. Per ogni interazione k , si procede valutando la funzione obiettivo su punti appartenenti ad una griglia, chiamata Mesh, indipendente dalla funzione obiettivo. La Mesh è definita da un insieme di direzioni (Pattern) e da uno scalare, Δ , che indica la distanza tra i punti della griglia. L'idea è quella di esplorare la griglia, centrata nel punto corrente (x_k), definito centroide, alla ricerca di un punto con funzione obiettivo migliore del punto corrente. Se la ricerca trova un punto nella Mesh che migliora il valore della funzione obiettivo, questo diventa il *Current point* per la successiva iterazione.

Gli algoritmi di Pattern Search più diffusi sono il Generalized Pattern Search (GPS) ed il Mesh Adaptive Direct Search (MADS). Questi sono classificati in funzione della base vettoriale di riferimento ($N+1$ o $2N$ dimensionale). La tecnica MADS risulta essere una variante del GPS. Essa si differenzia nel modo in cui viene determinato l'insieme di punti costituenti la Mesh: mentre il GPS utilizza vettori fissi di direzione, questa determina la Mesh impiegando un set casuale di vettori.

1.6.1.1. Il pattern

Un pattern è un insieme di vettori, $\{\vec{v}_i\}$ che l'algoritmo impiega ad ogni iterazione per determinare i punti utilizzati per la ricerca. Il set di array è definito dal numero di variabili

PARTE I

Stato dell'arte

indipendenti N presenti nella funzione obiettivo e dai versori di partenza. Le due basi più comuni di ricerca sono la Maximal ($2N$) e la Minimal ($N+1$) Positive Basis.

1.6.1.2. *Le meshes*

A ciascuna iterazione, la tecnica definisce un set di punti M_k chiamati Mesh in un intorno del centroide x_k . Una volta definiti i vettori direzionali, sia GPS che MADS formano M_k seguendo due step logici:

- Generazione di un insieme di vettori $\{\vec{d}_i\}$ ottenuti dalla moltiplicazione di ciascun pattern $\{\vec{v}_i\}$ con uno scalare Δ^k , chiamato Mesh Size: $\vec{d}_i = \Delta^k \vec{v}_i$.
- Sommando al punto corrente x_k i vettori $\{\vec{d}_i\}$ appena calcolati: $x_i = x_k + \vec{d}_i$.
- Definizione della Mesh: $M_k = \{x_i\}$.

La dimensione della mesh è quindi $\Delta^k = x_i - x_k$ per il GPS e $\Delta^k = \frac{\|x_i - x_{i-1}\|}{\|d_i\|}$

1.6.1.3. *Il Polling*

In corrispondenza di ciascun ciclo, la tecnica determina i punti da inserire nella Mesh calcolando i valori della funzione obiettivo (Polling phase). Il Polling può essere parziale, quando la fase termina non appena si trova un'immagine di x_i migliore di x_k , o completo, quando la fase termina una volta esplorati tutti gli x_i di M_k e scegliendo la $f(x_i)$ migliore. Se ciò si verifica, il Poll viene definito di successo e il punto così individuato, x^* migliore del punto x_k corrente, sarà il centroide dell'iterazione successiva. Se la ricerca sugli $x_i \in M_k$ non trova un valore in grado di migliorare la funzione obiettivo, il Poll non è di successo per cui il centroide x_k rimarrà inalterato nella successiva interazione, $k+1$. In seguito all'esito del Polling, la procedura varia il valore della dimensione della Mesh, Δ^k . In caso di esito positivo, Δ^k viene moltiplicato per un fattore di espansione, α_{EXP} , per cui $\Delta^{k+1} = \alpha_{EXP} \Delta^k$, altrimenti viene moltiplicato per un fattore di concentrazione, α_{CON} , per cui $\Delta^{k+1} = \alpha_{CON} \Delta^k$. Normalmente il fattore di concentrazione è pari all'inverso del fattore di espansione. La Figura 22 mostra un esempio di creazione della Mesh durante le varie interazioni k , mentre la Figura 23 mostra uno schema dell'applicazione del metodo Pattern Search.

PARTE I
Stato dell'arte

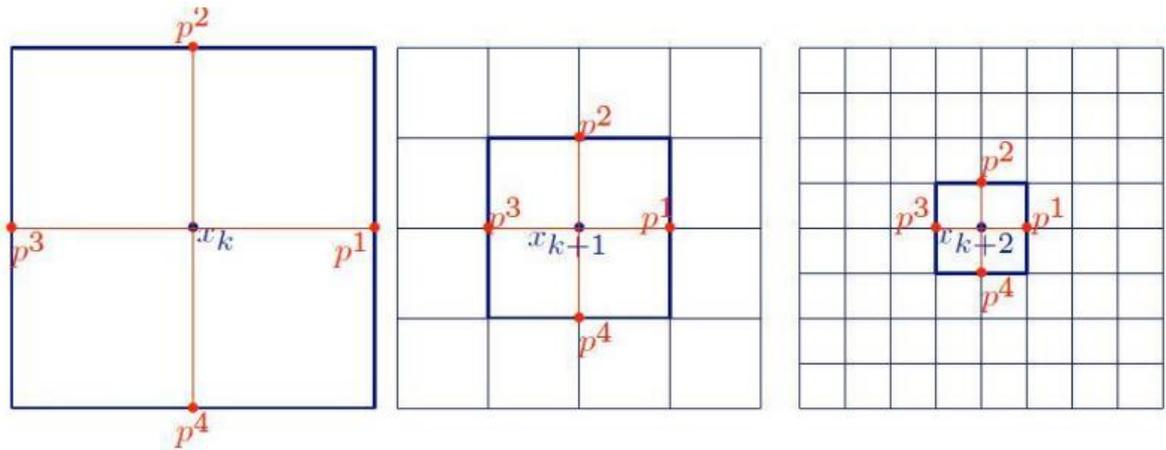


Figura 22: Esempio di creazione di una Mesh con polling phase negativo

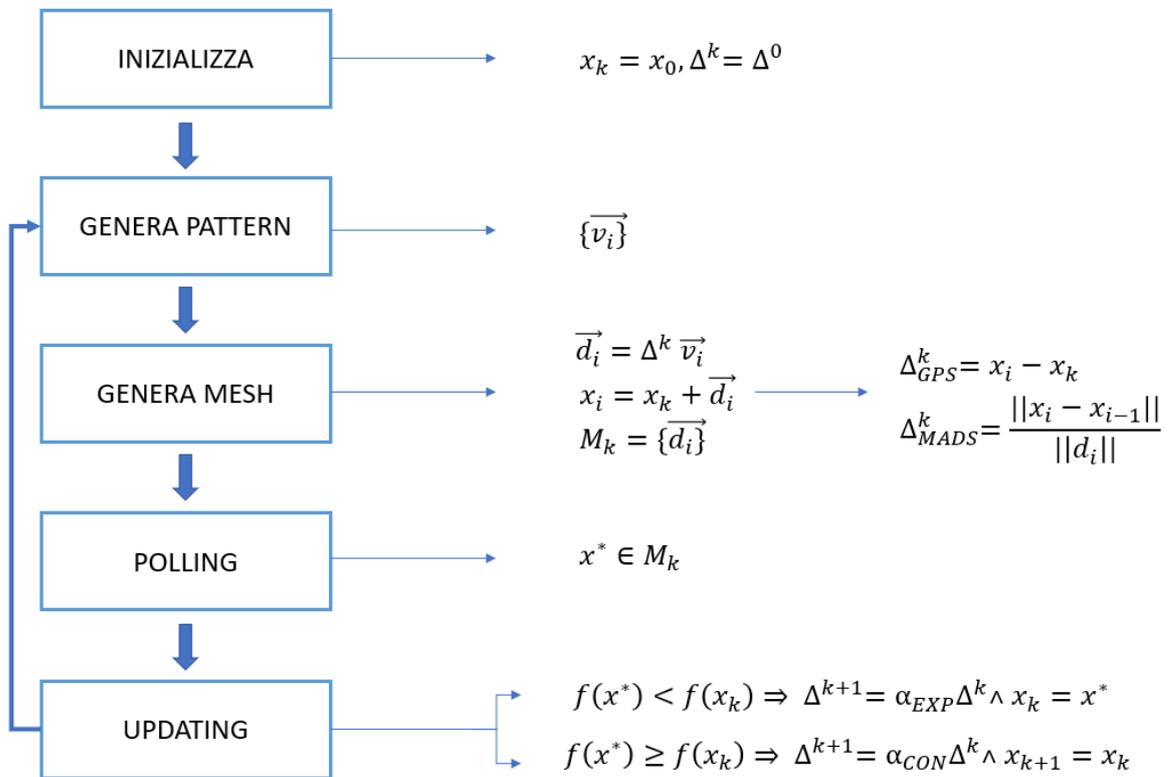


Figura 23: Schema delle operazioni svolta durante il processo di ottimizzazione tramite metodo Pattern Search

PARTE II
MATERIALI E METODI

2. VERIFICA E VALIDAZIONE DEI COMPONENTI

2.1. Il Veicolo di Riferimento

L'utilizzo del trasporto pubblico riduce il consumo di combustibile e le emissioni all'interno delle aree urbane a parità dei passeggeri. Gli incentivi all'utilizzo di una mobilità più sostenibile devono però essere accompagnati da un ammodernamento delle tecnologie che equipaggiano questa tipologia di veicoli, dotandoli di soluzioni innovative che siano in grado di migliorarne l'efficienza complessiva durante l'utilizzo.

Lo scopo, gli usi, ma anche le caratteristiche tecniche e geometriche di un autobus sono estremamente differenti da quelli di un veicolo per il trasporto passeggeri; la progettazione del veicolo, ivi compresa quella del sistema di gestione energetica, deve considerare queste diversità per ottimizzarne l'utilizzo in termini di comfort ed efficienza. L'autobus scelto come riferimento è un prototipo sviluppato dall'Oak Ridge National Laboratory. Il centro di ricerca ha reso ibrida l'unità di potenza di un Orion VII della Orion BUS Industries, al fine di condurre studi prestazionali ed energetici. In questo studio, partendo dalla base fornita dal centro di ricerca, verranno modellate e validate le componenti dell'autobus e verranno condotti degli studi per indagare l'impatto degli stessi sull'efficienza energetica del sistema. Verrà poi sviluppato un sistema di gestione energetica, quindi ottimizzato, e verrà confrontata l'economia di combustibile nelle varie configurazioni (trazione termica, trazione ibrida e trazione ibrida ottimizzata). In funzione dello scopo dell'indagine verrà utilizzato un modello di simulazione quasi statico o dinamico, sviluppato in ambiente sul software di modellazione virtuale Matlab/Simulink, tramite l'utilizzo delle formule discusse nei paragrafi precedenti. La Figura 24 riporta l'immagine dell'Orion VII con propulsione ibrida sviluppata dall'Oak Ridge National Laboratory, oltre che il layout della propulsione.

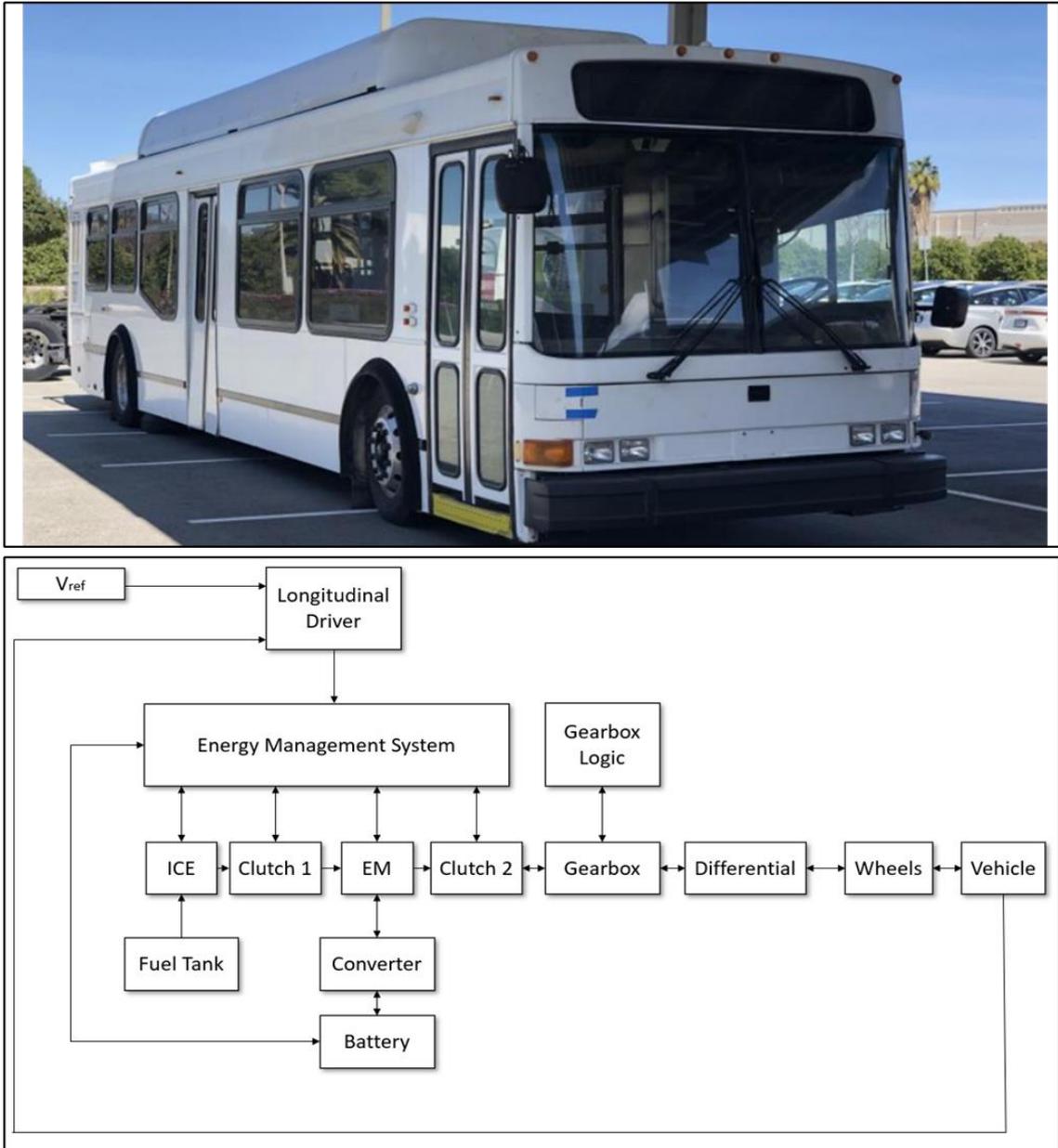


Figura 24: il veicolo sviluppato dall' Oak Ridge Laboratory e schema della propulsione

Dalla Figura 24 si evince che l'autobus è equipaggiato da due propulsori: un motore a combustione interna, con alimentazione Diesel, e una macchina elettrica. Il motore a combustione interna può essere accoppiato o disaccoppiato alla macchina elettrica tramite la frizione 1. La coppia generata dal motore termico può quindi prendere parte alla trazione, tramite l'albero di trasmissione collegato alla macchina elettrica, solo quando la frizione è ingaggiata. La macchina elettrica è poi collegata ad un cambio meccanico automatico a sei rapporti, che distribuisce la coppia dai propulsori al differenziale e quindi alle ruote motrici; l'architettura è di tipo ibrido termico\elettrico con EM in posizione P2.

PARTE II

Materiali e Metodi

La macchina elettrica, tramite il convertitore di potenza, scambia energia con un pacco batterie con tecnologia LiFePO₄. Il pacco batterie è formato da 25 paralleli di 187 celle disposte in serie, con un potenziale energetico massimo pari a 38.5 kWh. La Tabella 13 raccoglie le caratteristiche, geometriche e meccaniche, dell'autobus.

Tabella 13: caratteristiche geometriche e meccaniche del veicolo

<i>Componente</i>	<i>Parametro</i>	<i>Valore</i>
Motore termico	Potenza massima	192.2 kW
	Coppia Massima	998 Nm
	Inerzia ICE	1.1 kg·m ²
Macchina Elettrica	Potenza massima	185 kW
	Coppia Massima	2500 Nm
	Inerzia EM	0.4 kg·m ²
Batteria	Capacità Massima	62.5 Ah
	Tensione nominale	618 V
	Celle in serie	187
	Paralleli	25
Trasmissione	Rapporto I marcia	4.70
	Rapporto II marcia	2.21
	Rapporto III marcia	1.53
	Rapporto IV marcia	1
	Rapporto V marcia	0.76
	Rapporto VI marcia	0.67
	Inerzia marce	0.015 kg·m ²
Differenziale	Rapporto finale	4.56
	Inerzia differenziale	0.015 kg·m ²
Ruote	Raggio ruota	0.4993
	Inerzia ruota	7.45 kg·m ²
Freni	Superficie frenante	0.0122 m ²
	Efficienza	0.98
	Raggio di frizione	0.15 m
	Coefficiente d'attrito	0.3
Grandezze dimensionali	Massa veicolo	14515 kg
	Area Frontale	9 m ²
	Coefficiente di Drag	0.7
	Passo	6.1 m
	Lunghezza	12.46 m

2.2. Analisi e Validazione del Powertrain

Per poter sviluppare un sistema di controllo che ottimizzi la gestione energetica del veicolo, è fondamentale verificare che le equazioni matematiche, che simulano il comportamento dei componenti dell'unità di potenza, siano ben definite e che i risultati analitici siano paragonabili

PARTE II

Materiali e Metodi

alle misurazioni sperimentali, a meno di un errore ritenuto accettabile. Per questo motivo è stato condotto uno studio preliminare per la validazione delle equazioni e dei parametri che simulano il comportamento degli organi meccanici ed elettrici, quantificando l'errore tra risultati analitici e acquisizioni sperimentali.

2.2.1. Validazione delle Batterie

Vista l'importanza strategica del pacco batterie in un veicolo con propulsione ibrida elettrica, in questo studio verrà analizzato il comportamento, in termini di efficienza energetica, del veicolo quando equipaggiato con batterie di diverse tecnologie. Prima di analizzare il comportamento del veicolo verranno condotti degli studi per quantificare la differenza tra il modello matematico che descrive le batterie e le acquisizioni sperimentali. Delle tecnologie presentate, verranno validate delle celle rappresentative di ogni categoria, in particolare:

- Cyclon AMG-D 2.5 Ah prodotta da Enersys per le batterie al piombo acido [133];
- HHR250SCH 2.5 Ah prodotta da Panasonic per le batterie Nichel-Metallo [134];
- ANR26650M1-B 2.5 Ah LiFePo4 prodotta da A-123 System per le batterie al Litio [135].

Per ognuna di esse sono state confrontate le grandezze valutate dal modello matematico, implementato in ambiente Matlab/Simulink, con quelle presenti datasheets dei costruttori. In particolare, sono state confrontate le curve di tensione a vuoto della cella in funzione dello stato di carica e la risposta della tensione all'applicazione di carichi elettrici costanti, considerando diversi C-rate. Per la validazione del modello matematico si considera l'andamento dell'errore percentuale (%Err) e dello scarto quadratico medio (RMSE). L'equazione (2.1) descrive il calcolo dell'errore percentuale.

$$\%Err = \frac{y_i - y_s}{y_s} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Dove y_i è il valore della variabile valutata dal modello e y_s è il valore della variabile misurata sperimentalmente nelle stesse condizioni di simulazione. Le grandezze sono confrontate a parità di SOC. Per il calcolo di RMSE, ci si riferisce all'equazione (2.2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_t - y_t)^2}{n}} \quad (2.2)$$

PARTE II

Materiali e Metodi

Dove \hat{Y} è il valore predetto, y_t è il valore misurato ed n è il numero dei campioni.

2.2.1.1 Validazione Cyclon AMG-D 2.5 Ah

Le caratteristiche energetiche e geometriche della cella Cyclon AMG-D 2.5 Ah sono riportate in Tabella 14. I parametri presenti in Tabella 14 sono i primi ad essere considerati per la progettazione di un pacco batterie. Dal valore di capacità e di tensione è infatti possibile valutare il numero di celle ed il loro collegamento per ottenere una determinata corrente di scarica media a parità di potenza, cioè il numero di celle in serie ed il numero di celle in parallelo. Definiti i collegamenti, è possibile stimare anche il peso complessivo del pacco batterie. La Tabella 14 mostra anche i valori che sono stati assegnati alle costanti riportate nelle equazioni (1.43-1.45), ricavati dalle prove sperimentali rese disponibili dal costruttore.

Tabella 14: Caratteristiche tecniche Cyclon AMG-D 2.5 Ah

Valori nominali	
Chimica della cella	Piombo Acido con AGM e VRLA
Modello di Cella	Cyclon 2.5Ah (D)
Tensione Nominale	2 V
Capacità nominale	2.5 Ah
Energia Specifica	25.5 Wh/kg
Impedenza	0.005 Ohm
Cicli a fine vita	300 (standard IEC)
Scarica	
Corrente di scarica massima	25 A
Corrente di scarica impulsiva massima (10s)	65 A
Tensione minima	1.6 V
Caratteristiche Geometriche	
Diametro	0.0343 m
Altezza	0.062 m
Peso	0.196 kg
Costanti modello	
Tensione termodinamica	$E_0 = 2.1639$ V
Costante di polarizzazione	$K = 0.0139$ V/Ah
Ampiezza della zona esponenziale	$A = 0.0156$ V
Costante di tempo zona esponenziale inversa	$B = 15$ (Ah) ⁻¹
Resistenza interna	$R = 0.005$ Ohm
Tempo di risposta della batteria	$T_d = 1$ s
Pendenza zona di polarizzazione	$C = 0$ Ohm

La Figura 25 mostra il confronto tra l'andamento della tensione a vuoto valutato dal modello matematico con il valore di tensione a vuoto acquisito sperimentalmente dal costruttore. La Figura 26 e la Figura 27 mostrano, rispettivamente, la variazione della tensione di cella quando

PARTE II

Materiali e Metodi

sottoposta ad una corrente di scarica costante pari a 1C e 2.2 C. Nelle figure sono riportati anche gli errori percentuali tra le due curve. L'andamento delle tensioni, e soprattutto quello degli errori percentuali, dimostrano come il modello matematico riesca a simulare correttamente l'evoluzione della tensione della batteria nelle condizioni di carichi comuni. Solo per valori di SOC superiori al 95% l'errore tra le due curve cresce, restando comunque entro limiti accettabili (3.5%). A questi valori di stato di carica la batteria dimostra fenomeni di isteresi, come discusso precedentemente, ed è quindi prevedibile un errore maggiore. In ogni caso, generalmente, la frequenza di stati di carica superiori al 95% è molto inferiore rispetto a valori di SOC minori del 95%. Il costruttore identifica 1.6V come tensione minima raccomandabile per la cella, che in funzione della corrente di scarica si traduce in valori di SOC critici differenti. In Tabella 15 sono riportati i valori dell'RMSE ed il valore medio dell'errore percentuale di ogni prova. I risultati suggeriscono che il modello matematico descrive la cella in maniera adeguata.

Tabella 15: Risultati validazione cella Cyclon AMG-D 2.5 Ah

Cyclon AMG-D 2.5 Ah		
Prova	RMSE	Errore % medio
Tensione a vuoto	0.001 V	1.251
Scarica 1C	0.025 V	1.116
Scarica 2.2C	0.078 V	1.186

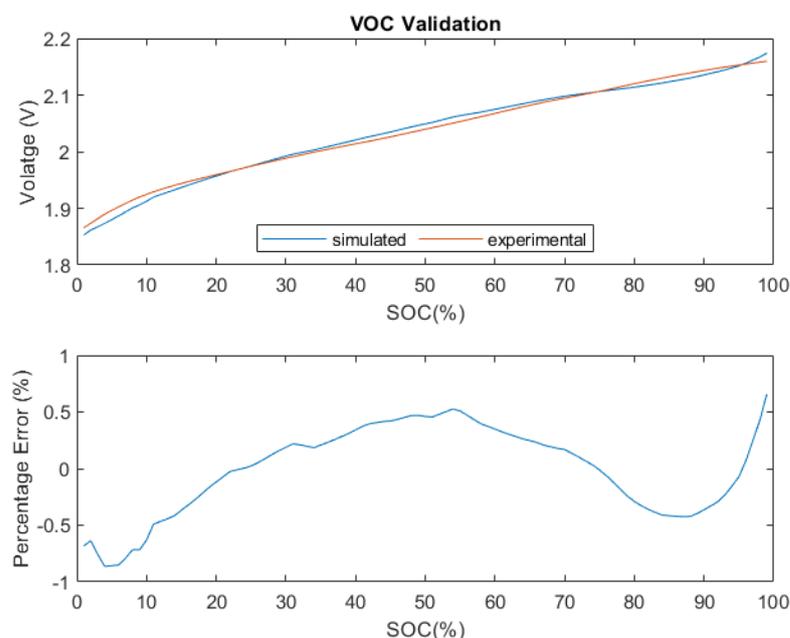


Figura 25: Confronto della variazione della tensione a vuoto della cella Cyclon AGM simulato e sperimentale

PARTE II

Materiali e Metodi

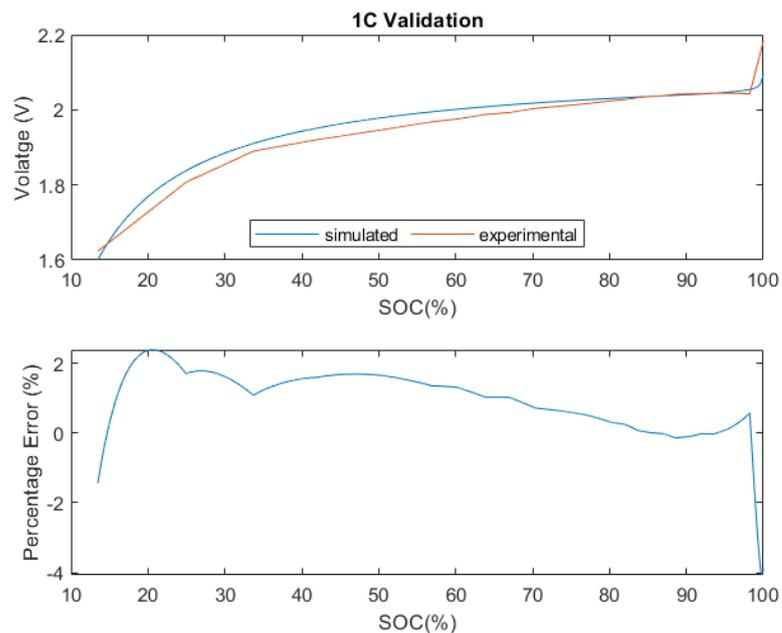


Figura 26: Confronto della variazione della tensione sotto in carico elettrico pari ad 1C della cella Cyclon AGM simulato e sperimentale

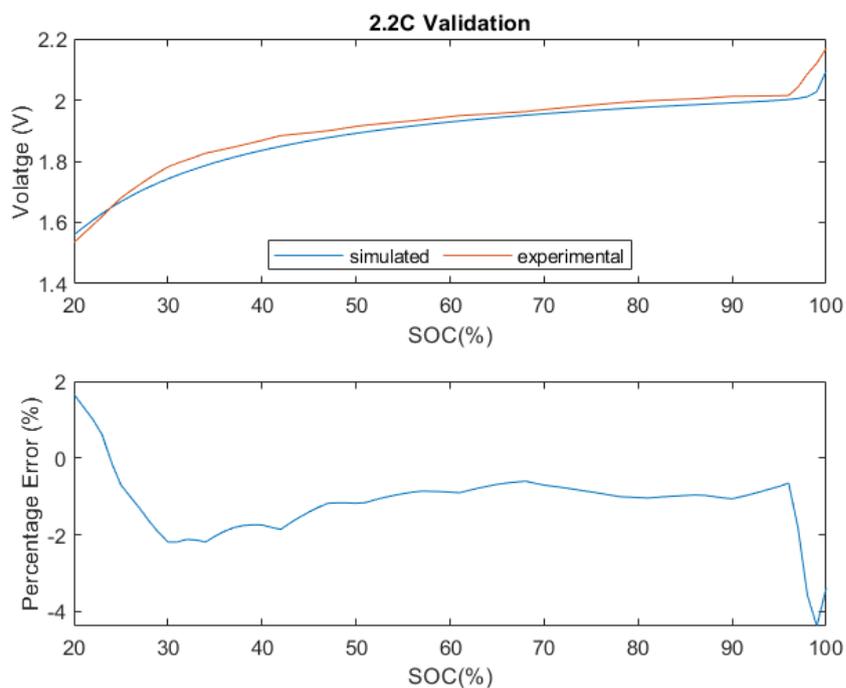


Figura 27: Confronto della variazione della tensione sotto in carico elettrico pari ad 2.2C della cella Cyclon AGM simulato e sperimentale

PARTE II

Materiali e Metodi

2.2.1.2 Validazione HHR250SCH 2.5 Ah

Le caratteristiche energetiche e geometriche della cella HHR250SCH 2.5 Ah sono riportate in Tabella 16, seguendo lo schema già presentato per le batteria al piombo in Tabella 14, ed estratti dal datasheet presentato dal costruttore. Come per le celle a base di piombo, anche per le celle con tecnologia Ni-MH è stato effettuato un confronto tra l'evoluzione della tensione acquisita sperimentalmente, quando la cella è sottoposta ad delle correnti di scarica costante, e l'evoluzione della tensione calcolata dal modello matematico simulando le stesse condizioni di funzionamento. Nel caso della cella in questione non sono disponibili le curve di tensione a vuoto, ma il costruttore fornisce l'evoluzione della tensione di cella se sottoposta ad una corrente di scarica pari a 0.1C. Analogamente alla considerazioni fatte per la cella Cyclon AMG, è stata confrontata la variazione di tensione, sperimentale e simulata, sottoponendo la cella ad una corrente di carica costante di 1C e 4C.

Tabella 16: Caratteristiche tecniche HHR250SCH 2.5 Ah

Valori nominali	
Chimica della cella	Ni - MH
Modello di Cella	HHR250SCH 2.5 Ah
Tensione Nominale	1.2 V
Capacità nominale	2.5 Ah
Energia Specifica	54.5 Wh/kg
Impedenza	0.005 Ohm
Cicli a fine vita	500 (standard IEC)
Scarica	
Corrente di scarica massima	25 A
Corrente di scarica impulsiva massima (10s)	75 A
Tensione minima	0.8 V
Caratteristiche Geometriche	
Diametro	0.023 m
Altezza	0.043 m
Peso	0.055 kg
Costanti modello	
Tensione termodinamica	$E_0 = 1.201 \text{ V}$
Costante di polarizzazione	$K = 0.0014 \text{ V/Ah}$
Ampiezza della zona esponenziale	$A = 0.0910 \text{ V}$
Costante di tempo zona esponenziale inversa	$B = 10 \text{ (Ah)}^{-1}$
Resistenza interna	$R = 0.005 \text{ Ohm}$
Tempo di risposta della batteria	$T_d = 1 \text{ s}$
Pendenza zona di polarizzazione	$C = 0 \text{ Ohm}$

Dal confronto dei parametri presenti nella Tabella 14 e nella Tabella 16 si nota che, nonostante la cella prodotta da Enersys dimostri una tensione nominale più alta, la cella prodotta da

PARTE II

Materiali e Metodi

Panasonic dimostra un'energia specifica pari a circa il doppio rispetto alla prima. Nelle due celle sono invece confrontabili i valori di corrente di scarica massima, sia continua che impulsiva. Rispetto alla tecnologia al piombo, le celle Ni-MH resistono circa il 70% in più ai cicli di carica e scarica, rendendole più idonee all'utilizzo non stazionario.

La Figura 28, la Figura 29 e la Figura 30 mostrano, rispettivamente, la variazione della tensione di cella quando sottoposta ad una corrente di scarica costante pari a 0.1C, 1C e 4 C. Nelle figure sono riportati anche gli errori percentuali tra le due curve. L'andamento delle tensioni, e soprattutto quello degli errori percentuali, dimostrano come il modello matematico riesca a simulare correttamente l'evoluzione della tensione della batteria sottoposta a rate di scarica comuni. Solo per valori di SOC superiori al 95%, e proporzionalmente al carico elettrico applicato, l'errore tra le curve cresce, comunque entro limiti accettabili (massimo di 3.5% a 4C). A questi livelli di stato di carica la batteria dimostra fenomeni di isteresi, come discusso precedentemente, ed è quindi prevedibile un errore maggiore, confermando gli andamenti già analizzati per le batterie al piombo. In Tabella 17 sono riportati i valori dell'RMSE ed il valore medio dell'errore percentuale di ogni prova. I risultati suggeriscono che il modello matematico descrive la cella in maniera adeguata.

Tabella 17: Risultati validazione cella HHR250SCH 2.5 Ah

HHR250SCH 2.5 Ah		
Prova	RMSE	Errore % medio
Scarica 0.1C	0.005 V	0.293
Scarica 1C	0.002 V	0.202
Scarica 4C	0.003 V	1.186

PARTE II

Materiali e Metodi

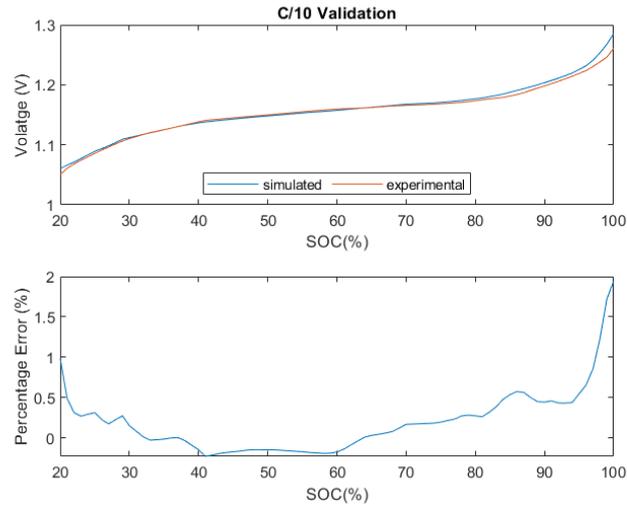


Figura 28: Confronto della variazione della tensione applicando un elettrico pari ad 0.1C della cella HHR250SCH 2.5 Ah simulato e sperimentale

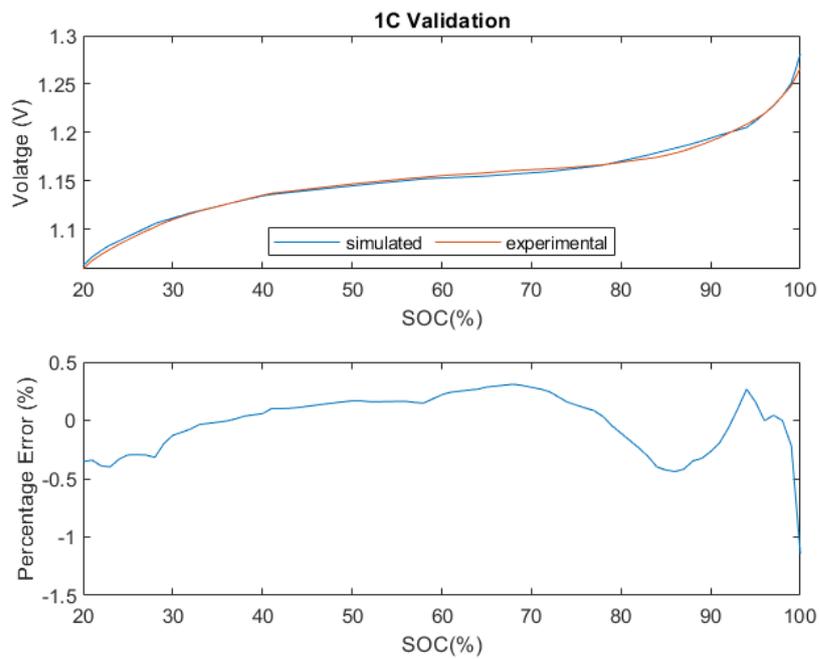


Figura 29: Confronto della variazione della tensione applicando un elettrico pari ad 1C della cella HHR250SCH 2.5 Ah simulato e sperimentale

PARTE II

Materiali e Metodi

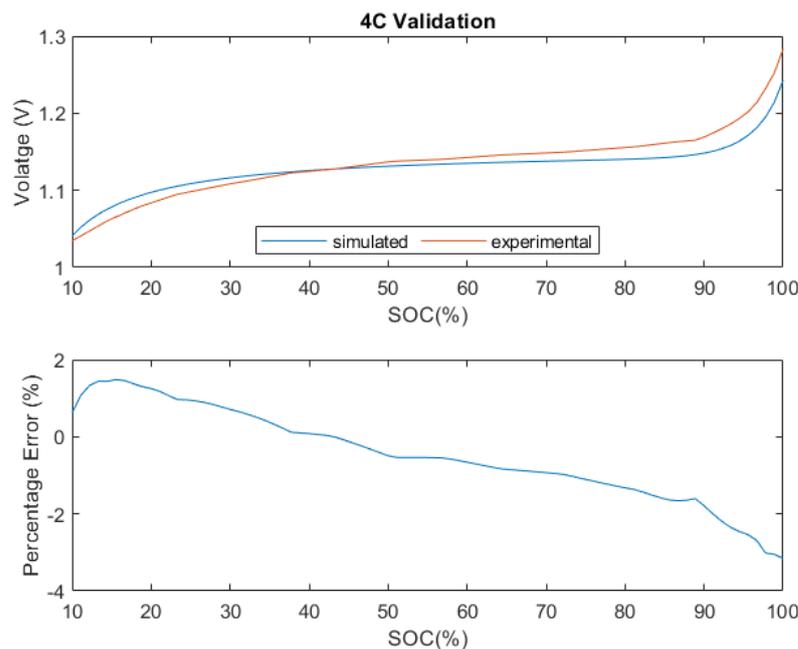


Figura 30: Confronto della variazione della tensione applicando un elettrico pari ad 4C della cella HHR250SCH 2.5 Ah simulato e sperimentale

2.2.1.3 Validazione ANR26650M1-B 2.5 Ah

Le caratteristiche energetiche e geometriche della cella con tecnologia LiFePO_4 sono riportate in Tabella 18 e sono quelle fornite dal costruttore. Come le celle prima trattate, anche per le celle al litio le informazioni riportate in Tabella 18 possono essere utilizzate per il dimensionamento del pacco batterie per la trazione. Confrontando le celle al litio con le altre tecnologie, si nota che la cella con tecnologia al litio ha un'energia specifica pari a circa il doppio rispetto alle celle Ni-MH ed il quadruplo rispetto alle celle al piombo. La tensione nominale della cella al Litio è più alta visti gli elementi chimici coinvolti, elemento che giustifica la maggior energia specifica e, conseguentemente, una maggior vastità di utilizzo. La Figura 31 mostra l'andamento della tensione a vuoto valutato dal modello matematico e lo confronta con il valore di tensione a vuoto valutato sperimentalmente dal costruttore. La Figura 32 e la Figura 33 mostrano, rispettivamente, la variazione della tensione di cella quando sottoposta ad una corrente di scarica costante pari a C/8 e 2 C. Nelle figure sono riportati anche gli errori percentuali tra le due curve. L'andamento delle tensioni, e soprattutto quello degli errori percentuali, dimostrano come il modello matematico riesca a simulare correttamente l'evoluzione della tensione della batteria. Anche in questo caso per valori di SOC superiori al 90% l'errore tra le due curve cresce, restando comunque entro limiti accettabili (3%).

PARTE II

Materiali e Metodi

Tabella 18: Caratteristiche tecniche ANR26650M1-B 2.5 Ah

Valori nominali	
Chimica della cella	LiFePO ₄
Modello di Cella	ANR26650M1-B 2.5 Ah
Tensione Nominale	3.3 V
Capacità nominale	2.5 Ah
Energia Specifica	110 Wh/kg
Impedenza	0.006 Ohm
Cicli a fine vita	>4000 (standard IEC)
Scarica	
Corrente di scarica massima	50 A
Corrente di scarica impulsiva massima (10s)	120 A
Tensione minima	2 V
Caratteristiche Geometriche	
Diametro	0.026 m
Altezza	0.065 m
Peso	0.075 kg
Costanti modello	
Tensione termodinamica	E0 = 3.3113 V
Costante di polarizzazione	K= 0.0066 V/Ah
Ampiezza della zona esponenziale	A= 0.1614 V
Costante di tempo zona esponenziale inversa	B= 6 (Ah) ⁻¹
Resistenza interna	R= 0.006 Ohm
Tempo di risposta della batteria	Td= 1 s
Pendenza zona di polarizzazione	C= 0 Ohm

Il datasheet della cella riporta come valore minimo di tensione 2V, che risulta essere in valore assoluto più alto rispetto a quello della cella al piombo e nichel, ma inferiore in relazione alla tensione nominale della cella. Ciò comporta che la cella con tecnologia al litio può sopportare correnti più alte fino a valori di SOC minori rispetto alla celle delle altre tecnologie. In Tabella 19 sono riportati i valori dell'RMSE ed il valore medio dell'errore percentuale di ogni prova. I risultati suggeriscono che il modello matematico descrive la cella in maniera adeguata.

Tabella 19: Risultati validazione cella ANR26650M1-B 2.5 Ah

ANR26650M1-B 2.5 Ah		
Prova	RMSE	Errore % medio
OCV	0.012 V	0.282
Scarica C/8	0.024 V	1.370
Scarica 2C	0.017 V	0.490

PARTE II
Materiali e Metodi

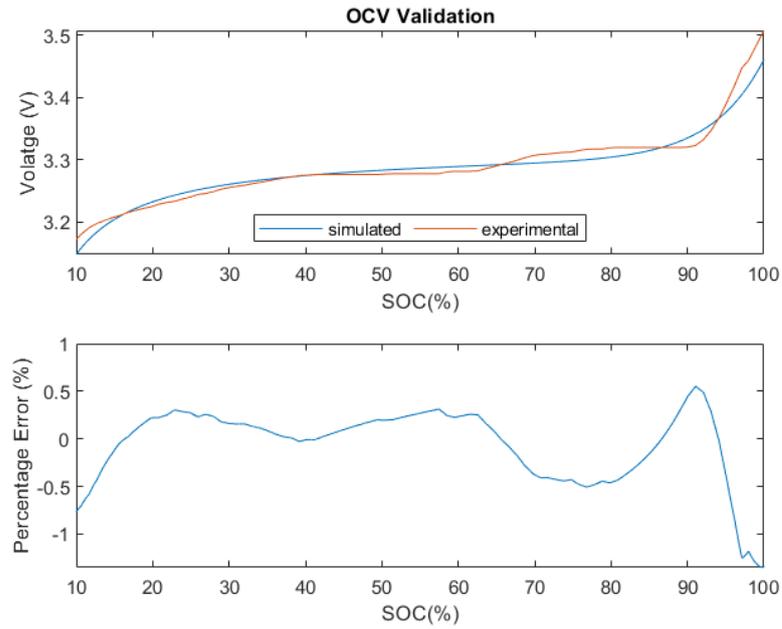


Figura 31: Confronto della variazione della tensione a vuoto della cella ANR26650M1-B 2.5 Ah simulato e sperimentale

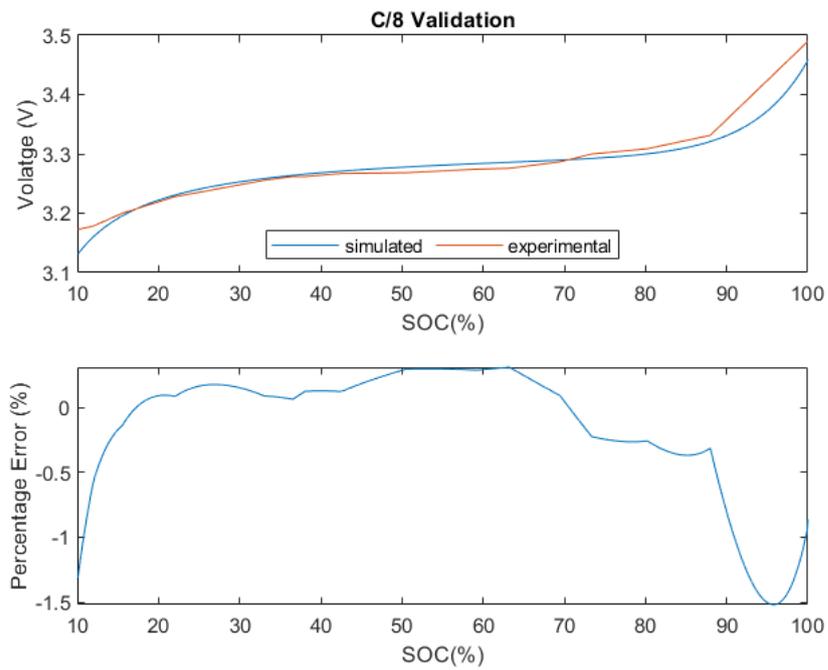


Figura 32: Confronto della variazione della tensione applicando un elettrico pari ad C/8 della ANR26650M1-B 2.5 Ah simulato e sperimentale

PARTE II

Materiali e Metodi

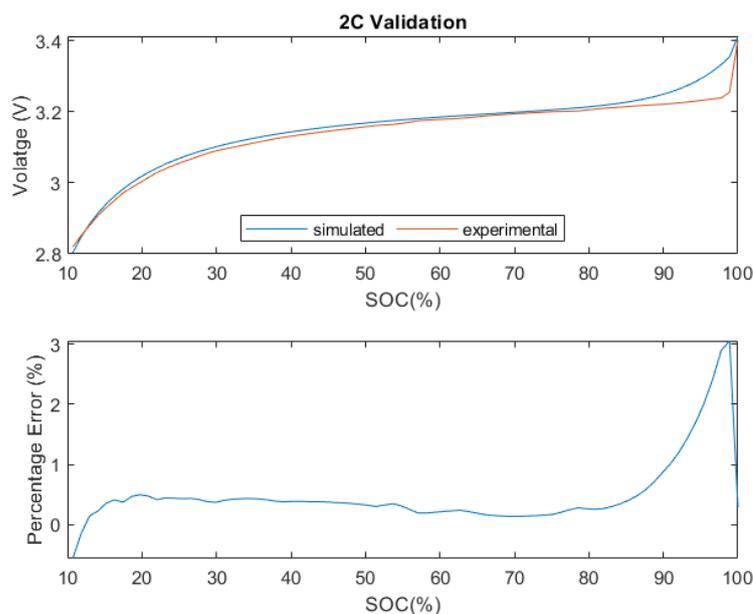


Figura 33: Confronto della variazione della tensione applicando un elettrico pari a 2C della ANR26650M1-B 2.5 Ah simulato e sperimentale

2.2.2. Validazione Motore Termico

Il motore a combustione interna che equipaggia il veicolo è il modello ISB 6.7 G prodotto dalla Cummins. Il propulsore ha una coppia massima pari a 998 Nm a 1300 giri/minuto ed una potenza massima di 192,2 kW a 2150 giri/minuto. Il motore è stato modellato tramite un approccio map-based, cioè le sue prestazioni vengono valutate in funzione della mappa di efficienza contenuta entro la curva caratteristica del motore. In [127] è riportata la mappa di efficienza del motore; mentre per ricavare la mappa del consumo di combustibile sono state applicate le equazioni (1.24-1.25); la Figura 34 riporta le mappe che definiscono le prestazioni del motore.

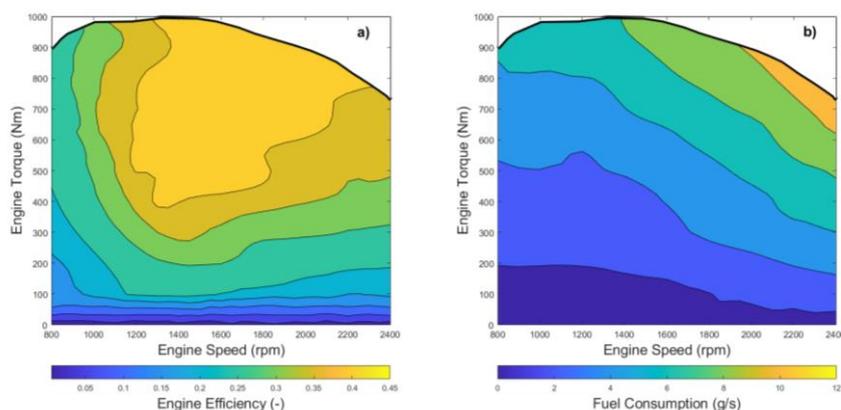


Figura 34: a) mappa di efficienza del motore b) mappa del consumo istantaneo di combustibile

PARTE II

Materiali e Metodi

Il processo di validazione della mappa che definisce i consumi, e conseguentemente anche della mappa di efficienza, è stato condotto tramite l'applicazione di un modello quasi statico sviluppato in ambiente Matlab\Simulink. In [127] sono state svolte delle campagne sperimentali per la valutazione delle performance energetiche del propulsore. Durante le prove sono stati acquisiti i dati riguardo l'evoluzione temporale della coppia e della velocità di rotazione del motore, così come la variazione temporale del consumo di combustibile cumulato durante la prova. I segnali sono stati acquisiti tramite il sistema di acquisizione *Vector Informatik*, scambiando informazioni con il veicolo tramite segnali su CAN bus con specifiche riferite al protocollo internazionale SAE J1939 e presentati in [127]. Tramite l'utilizzo del software *webplotDigitizer* è stato possibile ricavare i valori numerici delle acquisizioni presentate, così come i dati relativi alla mappa di efficienza del motore termico. Quantificare la differenza tra il consumo sperimentale e quello simulato, a parità di input (velocità di rotazione e coppia), darà indicazioni circa la capacità della mappa di simulare coerentemente i fenomeni reali. I risultati delle simulazioni sono mostrati in Figura 35. Dalle simulazioni si nota come la curva che rappresenta il consumo cumulato simulato e quella che rappresenta il consumo sperimentale siano praticamente coincidenti per circa l'80% della durata totale del tempo di simulazione, solo verso le fasi finali di simulazione aumenta l'errore.

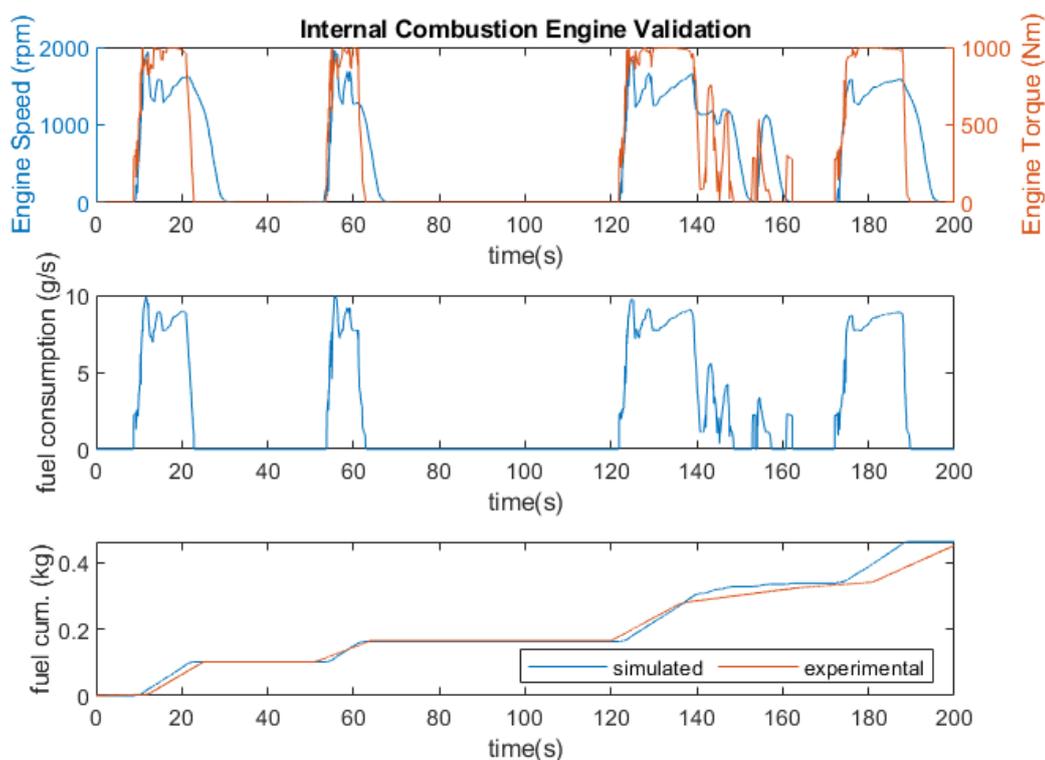


Figura 35: Andamento delle grandezze simulate per la validazione del motore termico

PARTE II

Materiali e Metodi

Nel secondo 162 della campagna di misurazione sperimentale, si nota l'applicazione di una coppia, seppur di valore trascurabile rispetto al resto del ciclo, ad una velocità del motore prossima a zero, fenomeno che si ripete anche al secondo 175. L'andamento delle coppie e delle velocità sperimentali fa intendere un piccolo shift dei valori verso la fine del ciclo, lì dove l'errore cresce. Dall'andamento delle velocità e delle coppie si evince anche l'utilizzo del sistema Start & Stop da parte del veicolo, atto a minimizzare il consumo di combustibile durante le soste. Come per la validazione delle celle elettrochimiche, anche in questo caso è il valore di RMSE e di errore tra le curve l'indice di qualità del modello. Il valore delle misurazioni, e la possibile deriva di acquisizione, potrebbero falsare il risultato del confronto dei dati. Per questo motivo in questo caso è stato valutato il valore assoluto dell'errore tra le curve, e non il percentuale. La Tabella 20 riporta il valore dell'RMSE e del valore medio dell'errore assoluto tra il consumo cumulato di combustibile. Il valore di RMSE, così come il valore dell'errore assoluto medio, confermano che la mappa del motore termico simulano in maniera adeguata i fenomeni reali.

Tabella 20: Risultati validazione motore termico

Validazione motore termico	
RMSE	Errore assoluto medio
0.0209 kg	0.0125 kg

2.2.3. Validazione Macchina Elettrica ed Inverter

La macchina elettrica che equipaggia il veicolo di riferimento è il modello TM5035 prodotta da JingJin Electric Technology, con alimentazione AC ed una potenza di picco di 185 kW. Dal calcolo del rapporto di ibridizzazione, tramite l'applicazione dell'equazione (1.1), il veicolo risulta essere un PHEV. La modellazione della macchina elettrica ha seguito un approccio map-based, è stata cioè definita la mappa di efficienza della macchina nei vari punti operativi delimitati dalla curva di coppia massima (funzionamento da motore) e di coppia minima (funzionamento da generatore). La mappa ingloba sia l'efficienza della macchina che dell'elettronica di controllo, quindi dell'inverter. Per ricavare le caratteristiche di funzionamento ci si è serviti del software *webplotDigitizer* che ha permesso, a partire dalla paletta cromatica che definisce la mappa di efficienza, di ricostruire il modello numerico della stessa. La mappa di efficienza della macchina elettrica, così come le curve caratteristiche di funzionamento da motore o da generatore, sono mostrate in Figura 36.

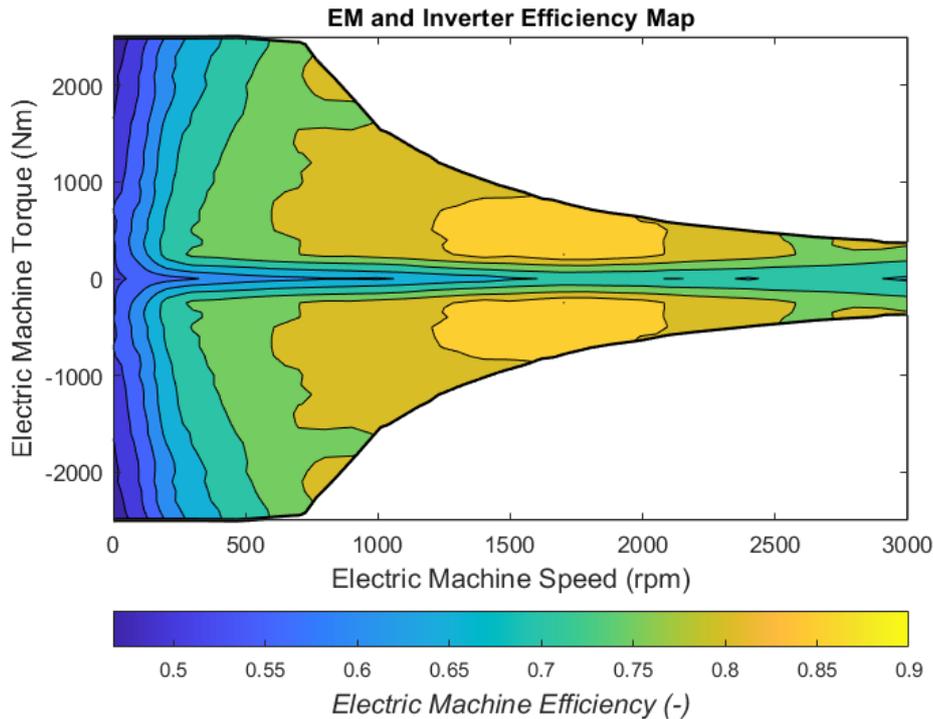


Figura 36: curve caratteristiche ed efficienza macchina elettrica TM5035

La validazione della mappa di efficienza della macchina elettrica e dell'inverter ha seguito un iter del tutto analogo ai processi di validazione della mappa del motore termico. In questo caso non sono disponibili i profili di coppia e velocità di rotazione a cui è stata soggetta la componentistica elettronica, ma è disponibile il profilo di velocità longitudinale del veicolo acquisito durante una campagna sperimentale, il profilo delle marce inserite, così come i carichi elettrici a cui il pacco batterie è stato sottoposto, nella forma di evoluzione temporale dello stato di carica. I segnali di input sono stati acquisiti tramite il sistema di acquisizione *Vector Informatik*, scambiando informazioni con il veicolo tramite segnali su CAN bus con specifiche riferite al protocollo internazionale SAE J1939 e presentati in [127]; tramite l'utilizzo del software *WebplotDigitizer* è stato possibile ricavare i valori numerici delle acquisizioni.

Attraverso lo sviluppo del modello quasi statico, imponendo lo stesso profilo di velocità al veicolo, è possibile ricavare l'andamento delle velocità e delle coppie nei vari organi di trasmissione fino a valutare i punti operativi della macchina elettrica. Tramite le equazioni (1.31) ed (1.32) è possibile legare la potenza meccanica richiesta al motore, sia positiva che negativa, con la potenza elettrica richiesta alla batteria, sia di ricarica che di scarica. La Figura 37 mostra il modello quasi statico sviluppato in ambiente Matlab/Simulink, l'evoluzione temporale del profilo di velocità, dell'angolo di inclinazione stradale e delle marce innestate acquisite

PARTE II

Materiali e Metodi

sperimentalmente. Dal profilo di cambiata si nota come la marcia innestata non sia mai inferiore alla prima marcia, questo conferma le assunzioni fatte precedentemente circa l'accoppiamento macchina elettrica/albero di trasmissione e utilizzo della frizione. Potendo erogare coppia anche a partire da velocità nulle, non è necessario disaccoppiare la trasmissione e la macchina elettrica, così come è superfluo innestare la marcia neutra a velocità del veicolo nulle. Nella realtà, durante il cambio marcia, è comunque necessario effettuare un passaggio nella marcia neutra prima di innestare la marcia successiva, almeno in un cambio tradizionale come quello simulato in questo studio. Questo fenomeno, non apprezzabile in questi grafici, verrà analizzato nei paragrafi successivi.

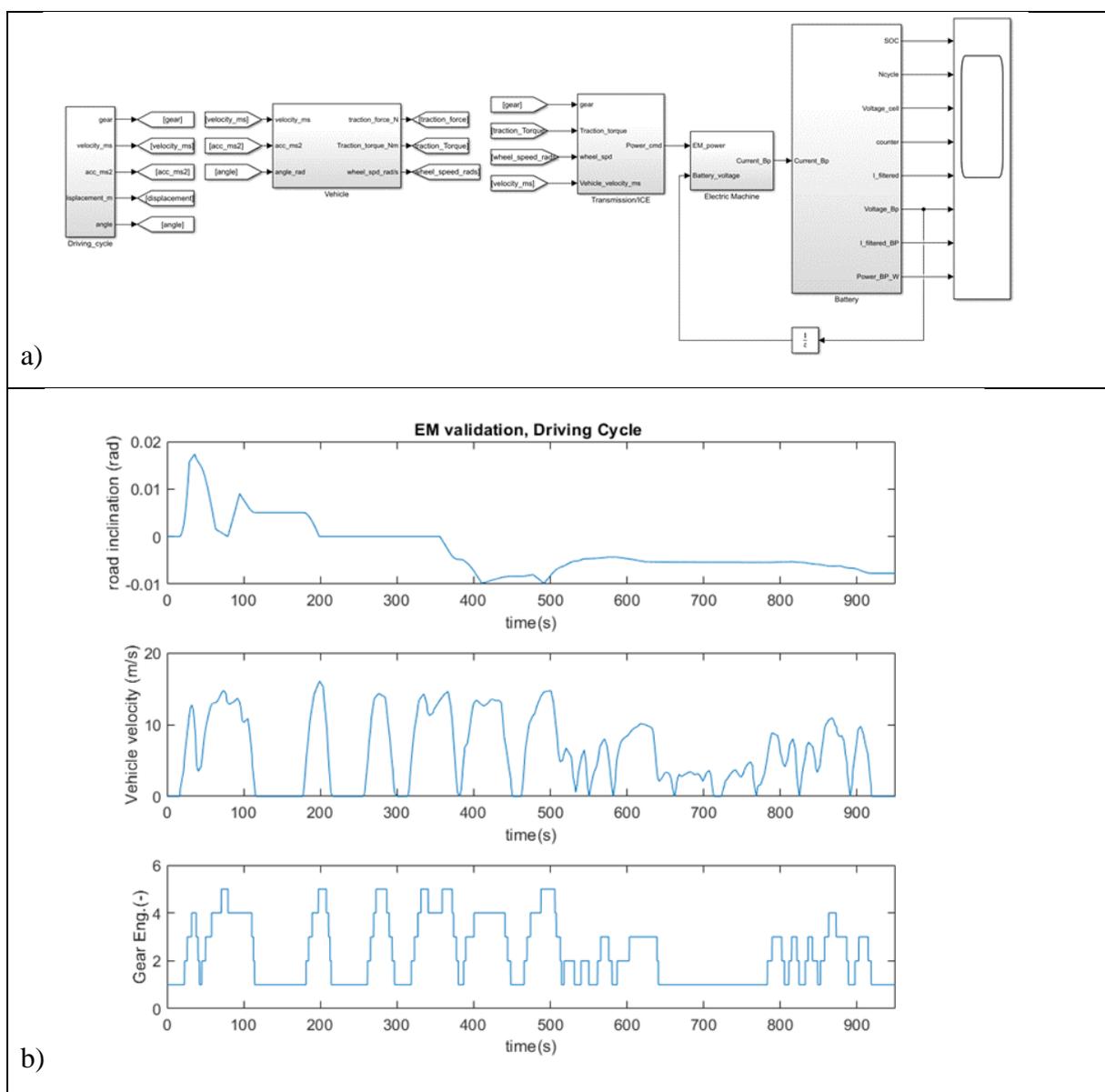


Figura 37: a) Schema modello Quasi Statico b) Dati di input del modello quasi statico per la validazione del powertrain e della componentistica elettrica

PARTE II

Materiali e Metodi

A partire dall'evoluzione temporale della velocità lineare del veicolo, della marcia innestata e dall'angolo di inclinazione stradale è possibile calcolare, conoscendo il raggio ruota (riportato in Tabella 13), la coppia richiesta alle ruote motrici. Noto il rapporto di trasmissione del differenziale, e noto il rapporto di trasmissione al cambio, è possibile calcolare la velocità di rotazione dell'albero primario e la coppia richiesta alla macchina elettrica, come presentato già nell'equazione (1.34). È opportuno inoltre verificare che la coppia richiesta alla macchina non sia mai superiore ai limiti meccanici della stessa. La potenza richiesta alla macchina elettrica è quindi convertita in potenza elettrica alla batteria, tenendo conto dell'efficienza della macchina stessa e del suo modo operativo. La Figura 38 mostra il confronto tra la potenza richiesta alla macchina elettrica e la potenza richiesta alla batteria. A differenza della potenza richiesta al motore termico, nell'evoluzione temporale della potenza richiesta alla macchina elettrica è possibile apprezzare anche i valori negativi. Questo è possibile grazie alla capacità della macchina stessa di lavorare da generatore e convertire l'energia cinetica del veicolo in energia di ricarica per la batteria (frenata rigenerativa). Quando la potenza è positiva la macchina elettrica sta lavorando da motore, cioè gli input stanno richiedendo coppia di trazione e la batteria sarà sottoposta ad un processo di scarica. Quando la potenza è negativa la macchina elettrica sta lavorando da generatore, gli input al modello stanno richiedendo coppia frenante e la macchina elettrica sta convertendo la potenza cinetica del veicolo in potenza di ricarica per la batteria. Dalla Figura 38 si nota come la potenza elettrica di scarica sia sempre superiore a quella meccanica richiesta dal motore, perché parte di questa si converte in energia termica nel motore (l'efficienza divide la potenza meccanica). La potenza elettrica di ricarica risulta essere sempre inferiore rispetto alla potenza meccanica; infatti, il generatore non riesce a convertire tutta la potenza meccanica in elettrica, convertendone una quota parte in potenza termica (l'efficienza moltiplica la potenza meccanica).

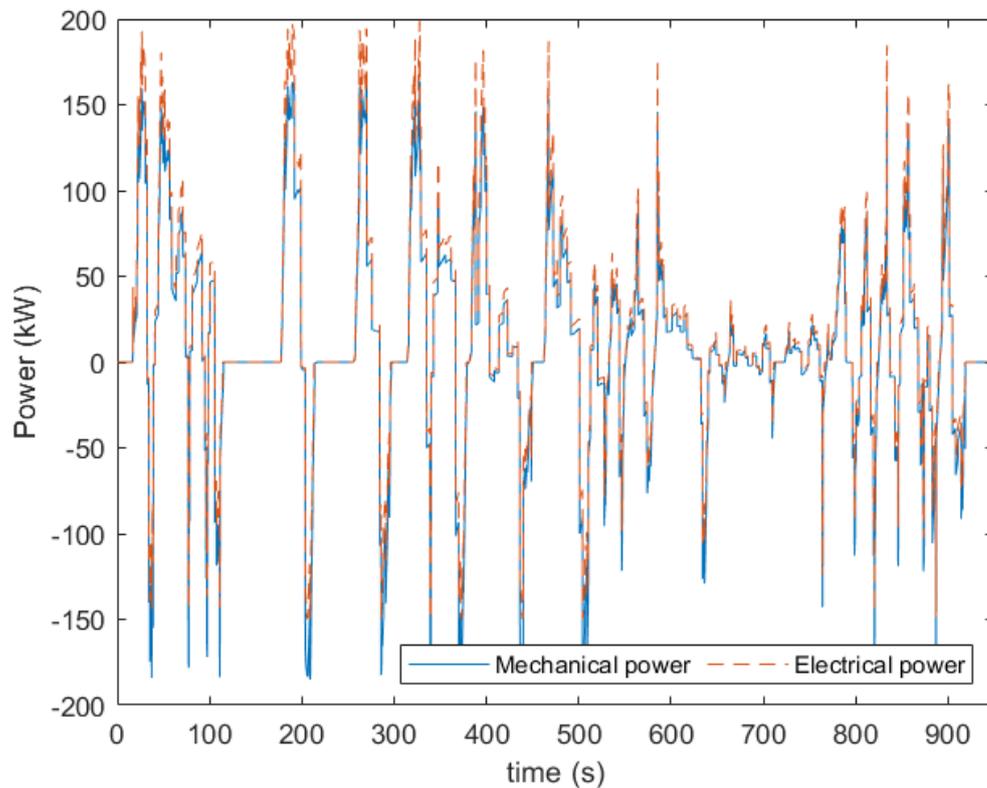


Figura 38: Confronto tra potenza elettrica e meccanica durante l'esecuzione del profilo di guida

La Figura 39 mostra l'evoluzione dello stato di carica della batteria simulato e quello acquisito sperimentalmente, oltre che l'errore relativo percentuale tra le due curve. Dall'andamento delle due curve si può apprezzare come il modello simulato riesca a valutare correttamente l'andamento dello stato di carica della batteria, che risulta estremamente paragonabile all'andamento dello stato di carica acquisito sperimentalmente. Dimostrazione della validità del modello numerico, e quindi dei parametri e delle mappe che lo hanno definito, è l'andamento dell'errore relativo percentuale. L'errore rimane infatti quasi sempre contenuto tra il ± 1 %

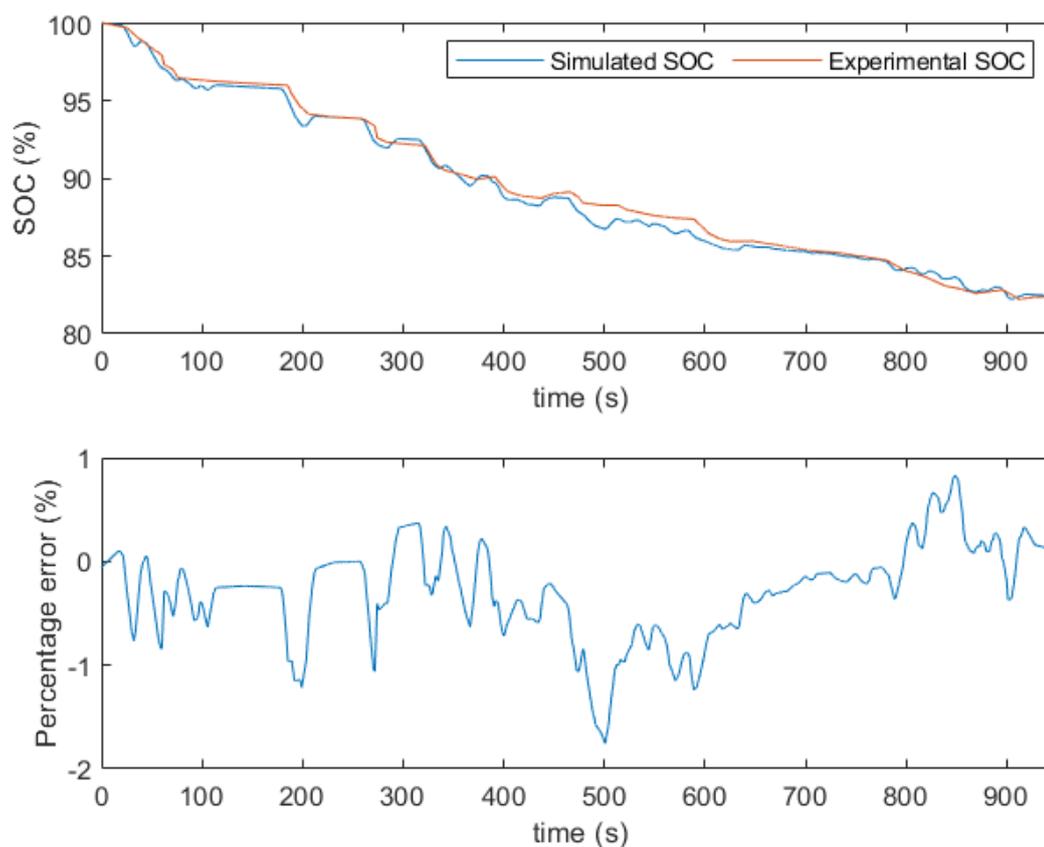


Figura 39: confronto tra l'evoluzione dello stato di carica acquisito sperimentalmente e simulato ed errore percentuale tra i due profili

I valori di RMSE e della media del valore assoluto dell'errore relativo percentuale, riportati in Tabella 21, confermano la correttezza dei parametri, delle mappe e delle equazioni che sono state utilizzate per realizzazione del modello matematico.

Tabella 21: risultati validazione powertrain e macchina elettrica

RMSE	Errore relativo percentuale assoluto medio
0.4743 %	0.4067 %

2.2.4. Confronto Prestazioni Energetiche al Variare della Tecnologia di Accumulo

Tramite lo stesso modello quasi statistico analizzato per la validazione degli organi di trasmissione e della macchina elettrica è stato effettuato il confronto tra le tre tecnologie di celle elettrochimiche, ossia piombo acido, nichel e litio. Nella sezione 1.4 è emerso che il mercato automobilistico si sta orientando sempre di più verso l'utilizzo delle celle al litio. Rispetto alle

PARTE II

Materiali e Metodi

altre tecnologie, le celle al litio risultano essere meno ingombranti e meno pesanti, hanno cioè un'energia specifica superiore. La letteratura ed i datasheet forniti dal costruttore confermano che le batterie al litio dimostrano una maggiore affidabilità nel tempo, risentono meno della perdita di capacità dovuta all'applicazione dei carichi elettrici e quindi si prestano meglio ad applicazioni che presentano carichi estremamente variabili come quelli tipici del trasporto urbano. Rispetto ad un'autovettura, però, un veicolo per il trasporto pubblico è progettato per assolvere a compiti diversi ed è necessario esaminare diversi aspetti legati alle geometrie, alle masse e ad ai carichi di funzionamento prima di confermare la tecnologia al litio come la più idonea ad equipaggiare il veicolo.

L'autobus infatti risente meno dei vincoli legati alle dimensioni del pacco batterie, essendo disponibile molto più spazio a bordo rispetto ad un'autovettura, così come le masse diventano un vincolo secondario. L'incidenza del peso del pacco batterie sull'autobus è decisamente inferiore rispetto all'incidenza che avrebbe su un'autovettura, che dimostra mediamente un peso molto più contenuto di quello di un autobus. I requisiti che definiscono il progetto del powertrain di un autobus non sono legati alle performance dello stesso, bensì al comfort dei passeggeri. Per garantire il comfort è quindi necessario limitare le accelerazioni sia positive che negative, elemento che si traduce in basse correnti di spunto richieste alla batteria quando la trazione è puramente elettrica. Considerando anche gli aspetti economici, è opportuno che la progettazione del mezzo cerchi di limitare il più possibile sia i costi diretti di produzione che quelli di manutenzione. Mediamente un autobus percorre più di 100 km al giorno ed è preferibile che riesca a rimanere in servizio per il maggior numero possibile di giorni all'anno, è necessario quindi che le manutenzioni siano contenute sia in numero che in prezzo, per garantire sempre il servizio ai cittadini e limitare le spese aziendali.

Da queste considerazioni nasce l'esigenza di valutare le performance delle tre tecnologie non solo in termini di chilometri percorsi, ma anche in relazione all'usura ed ai costi di manutenzione.

Per poter eseguire il confronto è necessario che i pacchi batteria siano dimensionati in modo da poter fornire la stessa energia. Il riferimento per l'energia è il pacco batteria con tecnologia al litio, dimensionato dall'Oak Ridge laboratory e validato nel paragrafo precedente. È importante, infatti, che gli elementi a confronto siano in grado di erogare la stessa tensione nominale e che abbiano la stessa capacità massima. Il pacco batterie al litio è in grado di fornire una tensione nominale di 617 V e possiede una capacità massima di 62.5 Ah. Per tale motivo è necessario definire il numero di celle in serie, così come il numero dei paralleli, per ottenere gli stessi valori

PARTE II

Materiali e Metodi

di tensione nominale, capacità e potenziale energetico nominale anche per i pacchi batteria con tecnologia piombo acido e Ni-MH. Le caratteristiche dei tre pacchi batteria sono riportate in Tabella 22.

Tabella 22: caratteristiche energetiche e geometriche dei pacchi batteria

	Litio	Piombo	Ni-MH
Tensione nominale (V)	617.1	618.0	616.8
Capacità massima (Ah)	62.5	62.5	62.5
Energia nominale (kWh)	38.5	38.5	38.5
Numero di celle in serie	187	302	514
Numero di paralleli	25	25	25
Massa (kg)	368	1435	795
Volume (m³)	0.161	0.436	0.229
Energia specifica (Wh/kg)	96.25	26.82	42.40

I dati riportati in Tabella 22 confermano che, a parità di energia, la massa del pacco batterie al piombo supera di più di tre volte quella del pacco batterie al litio, analogamente il volume. Il pacco batterie con tecnologia Ni-MH ha un peso più contenuto rispetto a quello al piombo, ma comunque doppio rispetto al pacco batterie al litio. L'aumento di massa si tradurrà necessariamente in un aumento del carico meccanico, quindi elettrico, che potrebbe comportare la percorrenza di una minor distanza a parità di stato di carica. Il volume superiore del pacco batterie può comportare una diminuzione dei posti disponibili per i passeggeri o più plausibilmente una riprogettazione dell'alloggiamento.

L'analisi del comportamento delle varie tecnologie è stata condotta ricostruendo il profilo di velocità, di inclinazione stradale e di marcia richiesta immaginando che l'autobus percorra la tratta in direzione normale ed in direzione opposta, quindi un ciclo di andata e ritorno. I cicli di andata e ritorno sono stati ripetuti fino a formare una distanza complessiva di 100 km, anche se la prova è stata condotta fino a far raggiungere stato di carica pari al 25%. Considerando i risultati ottenuti nella validazione della macchina elettrica (Figura 39), non ci si aspetta una distanza percorsa superiore a 30 chilometri.

La Figura 40 mostra la richiesta di potenza meccanica al motore quando l'autobus è equipaggiato con le diverse tecnologie. Dal grafico si nota come la potenza positiva richiesta al motore quando l'autobus è equipaggiato con le batterie al piombo è sempre superiore rispetto a quella richiesta all'autobus equipaggiato con pacco batterie al nichel, e conseguentemente anche al litio. Questo è dovuto all'aumento di massa dell'autobus che si traduce in un aumento di

PARTE II

Materiali e Metodi

richiesta di potenza. D'altro canto, anche la potenza recuperata in frenata è superiore, in valore assoluto, quando l'autobus è equipaggiato con le batterie a base di piombo rispetto alle altre due tecnologie, proprio perché aumentando le masse aumenta anche la potenziale cinetico.

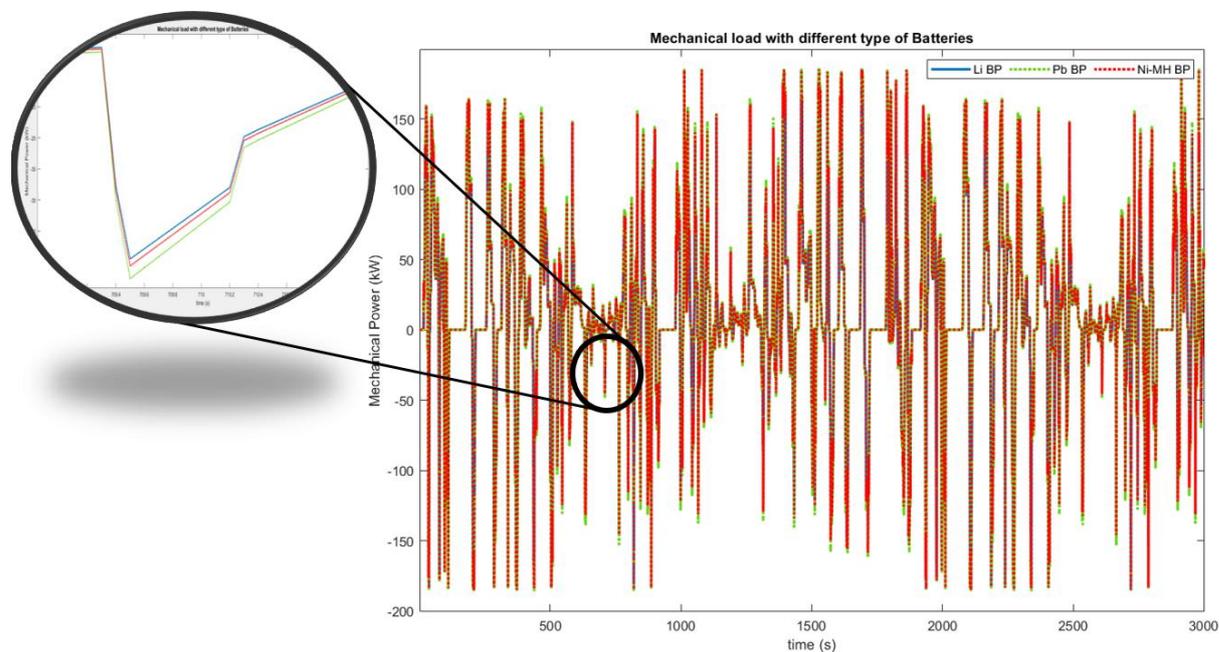


Figura 40: Confronto potenza meccanica al motore equipaggiando l'autobus con batterie di diverse tecnologie

Dal punto di vista elettrico invece bisogna considerare che, anche se le celle delle tre tecnologie possiedono la stessa capacità massima nominale, dimostrano dei comportamenti estremamente differenti durante l'applicazione dei carichi elettrici. Panasonic, nello sviluppo delle celle Ni-MH, si è concentrata nell'offrire un prodotto in grado di resistere alle variazioni di carico estreme. La cella dimostra quindi una capacità di almeno 2.5Ah in tutte le condizioni di carico (dichiarato fino a 12C), con picchi di 2.65 Ah nelle condizioni di scariche minime (0.5 A). Discorso analogo per la batterie al lito, che dimostrano una capacità di almeno 2.5Ah con correnti di scarica inferiori a 10C, dimostrando capacità di 2.6Ah con correnti di scarica di C/8. Le celle al piombo acido, invece, dimostrano il comportamento opposto. Il datasheet del costruttore, infatti, mostra che la capacità della cella è pari a 2.5 Ah solo per correnti di scarica prossime a 0.28 A, capacità che diminuisce drasticamente al crescere della corrente di scarica. Questo effetto gioca un ruolo preponderante durante l'esercizio della cella e dell'intero pacco batterie, influenzando enormemente sulla distanza percorsa. La Figura 41 mostra l'andamento della capacità della batteria al piombo al variare del rate si scarica. Dal grafico in Figura 41 si nota che a correnti di

PARTE II

Materiali e Metodi

carica prossime a 2.5 A, quindi C1, la capacità della batteria sia prossima a 2 Ah, crollando a 1Ah per correnti prossime ad 8C.

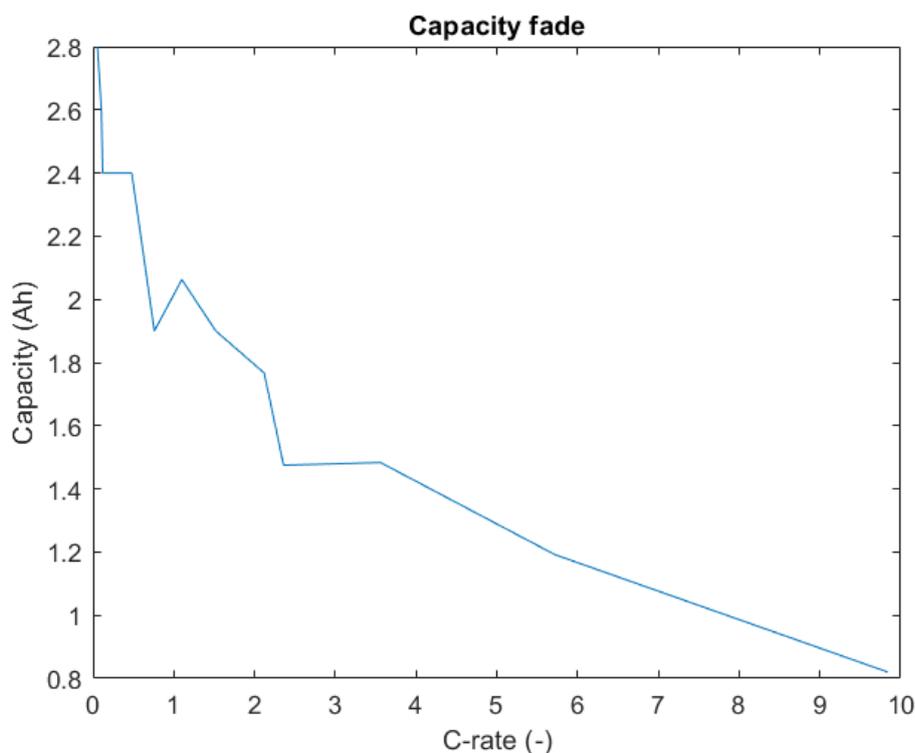


Figura 41: Perdita della capacità massima al variare del C-rate per le celle a base di piombo.

Imponendo a simulazione un ciclo completo del profilo di velocità, quindi il tragitto di andata e ritorno, l'autobus percorre una distanza complessiva di 11,5 km in 1900 secondi, con una velocità media di circa 22.5 km/h. Valutando l'andamento delle correnti a cui sono sottoposti i pacchi batteria, considerando il loro valore assoluto, è possibile verificare come la media per i tre pacchi batteria sia relativamente simile, mentre è differente la distanza percorsa nelle tre configurazioni. Il decremento del SOC, estremamente più rapido nel pacco batterie al piombo, è proprio da ricercarsi nella diminuzione della capacità in funzione della corrente erogata. La maggiore potenza richiesta nelle fasi di accelerazione positiva è relativamente compensata dal maggior quantitativo energetico recuperabile in frenata. La variazione di peso dell'autobus nelle diverse configurazioni ha comportato una variazione dei punti di funzionamento, e quindi dell'efficienza complessiva, come riportato in Tabella 23. La Figura 42 mostra la variazione dello stato di carica considerando una distanza percorsa di 17.51 km, ossia quando il pacco batterie a base di piombo raggiunge SOC=25%.

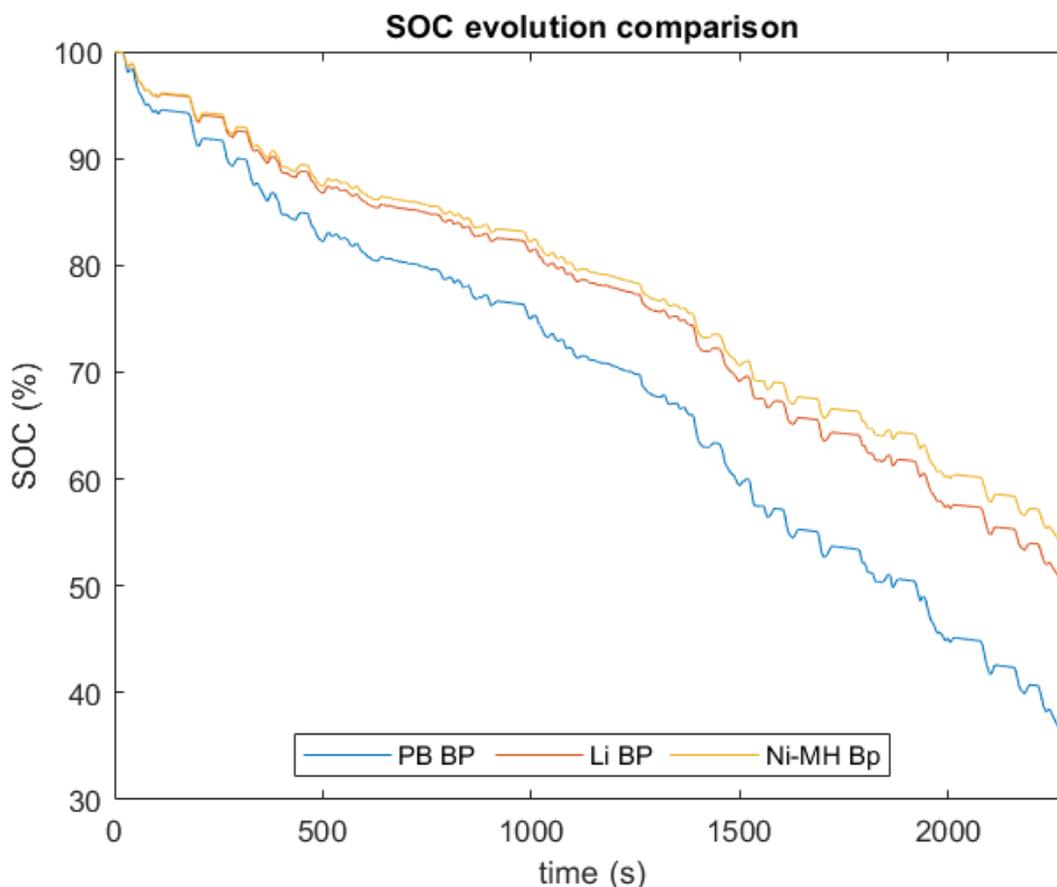


Figura 42: Evoluzione dello stato di carica dei pacchi batterie di diverse tecnologie a parità di distanza

A parità di distanza percorsa, il pacco batterie al litio dimostra avere un comportamento intermedio tra il pacco batterie al piombo e quello al nichel. La cella al piombo sembra essere quella meno adatta ad equipaggiare l'autobus, mentre la cella al litio ha un comportamento quasi equivalente alla cella al nichel, come confermato dalla Tabella 23.

Tabella 23: confronto prestazioni delle tre tecnologie di accumulatori

Parametro	Pb	LiFePO ₄	NI-MH
Durata (s)	2923	3592	3873
Distanza (km)	17.51	21.6	23.54
Velocità media (km/h)	21.56	21.64	21.88
Efficienza media (%)	73.04	72.90	72.94
N. cicli A/R	1.52	1.87	2.04

Dalla Tabella 23 emerge che con una singola ricarica l'autobus equipaggiato con la tecnologia al Nichel riesca a percorrere, in modalità elettrica (fino a SOC pari a 25%), una distanza superiore di circa l'8 % rispetto all'autobus con tecnologia al litio, e di circa il 34% rispetto alla tecnologia

PARTE II

Materiali e Metodi

al piombo, per il ciclo considerato. I risultati in Tabella 23 confermano, inoltre, che i pacchi batterie risultano essere estremamente sottodimensionati per il solo utilizzo in elettrico ed è quindi necessario integrare l'energia necessaria tramite l'utilizzo di un'altra fonte energetica. Per effettuare una valutazione prettamente economica, si consideri che l'autobus sia equipaggiato solo dal motore elettrico e quindi l'unica fonte energetica sia la batteria. Si ipotizzi inoltre che l'autobus percorra una media di 100 km al giorno per 300 giorni l'anno. Tramite i dati presenti in letteratura, e riportati nelle tabelle presenti nel paragrafo 2.2.1, è possibile analizzare le tre tecnologie anche dal punto di vista economico.

Tabella 24: confronto economico a lungo termine tra le tre tecnologie di accumulatori elettrochimici

	Piombo	Nichel	Litio
cicli a fine vita	300	500	4000
Energia	38.62	38.62	38.62
Costo unitario €/kWh	150	1000	600
Costo totale	5793	38620	23172
Numero di ricariche giornaliere	6	4	5
Cicli per anno	1800	1200	1500
Durata (anni)	0.17	0.41	2.6
Costo ogni cinque anni €	170382	470975	44561

I dati riportati in Tabella 24 confermano che:

- 1) I pacchi batteria sono sottodimensionati per una percorrenza in modalità totalmente elettrica. Seppure questa può essere ammessa, non può essere la modalità principale di funzionamento dell'autobus. Per considerare una trazione puramente elettrica per l'autobus, bisogna aumentare il numero di paralleli e riprogettare il powertrain per migliorare l'efficienza complessiva della componentistica elettronica.
- 2) La tecnologia al litio risulta essere la scelta più adeguata a costituire la fonte energetica dell'autobus. Il maggior costo rispetto alle batterie a base di piombo e la minore distanza percorsa, a parità di ciclo di guida, rispetto alle batterie a base di nichel sono ampiamente compensati dall'elevato numero di cicli a fine vita.

Confermata la tecnologia al litio la migliore scelta per il veicolo, per la validazione delle equazioni che descrivono il degrado della batteria sono stati simulati, in ambiente Matlab/Simulink, dei cicli di carica e scarica con correnti note e sono stati confrontati i risultati ottenuti sperimentalmente e descritti da Mutapon et al. in [125]. Per poter eseguire le simulazioni

PARTE II

Materiali e Metodi

è stato necessario definire le costanti presentate nella sezione 2.2.1.3 che descrivono il comportamento dinamico della batteria. Mutapon et al. in [125] descrivono i test eseguiti per la definizione dei parametri, in particolare è stata utilizzata:

- Una camera climatica per il controllo della temperatura di esercizio della cella (Thermotron XSE - 600)
- Un generatore di carico controllato variabile per imporre le correnti di carica e di scarica (PCBA 5010-4)
- Celle LiFePO_4 del tipo ANR26650M1-B 2.5 Ah prodotte dall' A123 System.

Per la definizione dei parametri sono stati eseguiti cinque test in cui sono state variate le condizioni di scarica, di carica, di profondità di scarica e temperatura. Le cinque configurazioni di carico sono riportate in Tabella 25.

Tabella 25: Test Pattern utilizzati per la definizione dei parametri che descrivono i fenomeni di degrado della cella con tecnologia LiFePO_4

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
DOD	100 %	100%	25 %	100 %	100%
Rate di scarica	2C	2C	2C	8C	2C
Rate di carica	1C	1.5C	1.5C	1.2C	1.2C
Temperatura	23°C	23°C	23°C	23°C	45°C

Inizialmente i test sono stati condotti fino ad ottenere una diminuzione della capacità nominale pari al 5%. Noto il numero di cicli sperimentati dalla batteria all'ottenimento di $Q_c=0.95 \cdot Q_{BOL}$, e noto il numero di cicli sperimentati dalla batteria fino al degrado massimo consentito ($Q_c=Q_{EOL}$) in un singolo test, è stato possibile ricavare le costanti che completano il modello matematico. La Tabella 26 raccoglie il numero di cicli necessari a degradare la batteria fino al 95% della capacità nominale per ogni test descritto in Tabella 25. La Tabella 26 mostra anche il numero di cicli sperimentati dalla batteria fino al raggiungimento della capacità di End of Life nel Test 1 ($N1^*$), così come il valore dei parametri di calibrazione del modello matematico che descrive il degrado della batteria.

PARTE II

Materiali e Metodi

Tabella 26: Risultati prove sperimentali per la definizione dei parametri

Dati per l'identificazione dei parametri					
N1	N2	N3	N4	N5	N1*
2200	1850	10312	390	930	9175
Parametri del modello					
N _{Cref}	φ	γ_2	γ_1	α, β	ρ
9175	3.7e3	0.8	2.34	0.9708	0.8

Noti i parametri sono state eseguite delle simulazioni per il confronto tra la variazione di capacità sperimentata dalla batteria durante l'applicazione dei carichi e quella valutata in simulazione nelle stesse condizioni. Le condizioni di carico sono le stesse dei test descritti in Tabella 25, è differente però il numero di cicli considerati fino al termine del test. La Tabella 27 riporta i risultati delle simulazioni di validazione. I risultati in Tabella 27 mostrano che il modello matematico riesce a rappresentare in maniera adeguata i fenomeni, dimostrando un errore percentuale nella valutazione del degrado della batteria al termine di ogni test mai superiore al 2.5%.

Tabella 27: validazione della matematica che descrive i fenomeni di degrado della batteria

Test	N. cicli	Qc Sper.	Capacità persa (%)	Qc simulata	Err. Perc (%)
1	3165	2.284	91.36	2.324	1.75
2	3098	2.256	90.24	2.299	1.94
3	14541	2.327	93.08	2.365	1.64
4	1483	2.031	81.24	2.061	1.50
5	1470	2.252	90.08	2.300	2.15

2.2.5. Confronto Prestazioni Energetiche al Variare della Macchina Elettrica

Dalle simulazioni condotte precedentemente è emerso come l'efficienza della macchina elettrica nei vari punti operativi possa influenzare le prestazioni del veicolo in termini di distanza percorsa a parità di profilo di velocità. La scelta di una macchina elettrica adeguata, così come la progettazione della catena cinematica (rapporti di trasmissione, unità differenziale, dimensioni ruota), può aumentare enormemente l'efficienza globale della trasmissione elettrica. Per tale motivo in questo paragrafo verrà indagata la variazione di prestazione energetica del veicolo di riferimento confrontando la macchina elettrica TM5035 con il modello Sumo MD HV3000-6p, prodotto da Dana Motors. I sistemi TM4 SUMO MD sono progettati per interfacciarsi direttamente con differenziali e/o cambi posteriori standard. Ciò rende questa serie perfetta per i

PARTE II

Materiali e Metodi

veicoli commerciali, soprattutto da classe 2 a classe 6, e per le piattaforme di autobus di medie dimensioni. In particolare, il Sumo MD HV3000-6p, è una macchina elettrica con tecnologia a magneti permanenti, progettata per operare in tutti e quattro i quadranti operativi di una macchina elettrica (coppia e velocità di rotazione sia positive che negative) ed è disponibile nella versione a “doppio albero”. Essendo nel caso in esame la macchina elettrica posizionata tra il cambio meccanico ed il motore termico (posizione P2), l’opzione doppio albero è fondamentale per permettere il collegamento meccanico tra i componenti. La macchina elettrica è fornita con un inverter a 6 fasi, con frequenza di switching variabile, che alimenta la macchina con una tensione di 600V. In Tabella 28 sono riportate le sue caratteristiche meccaniche e di potenza, mentre la Figura 43 ne mostra le curve caratteristiche e l’ingombro geometrico. La macchina elettrica è stata validata in una campagna di prove sperimentali condotte presso il *Dana Cologne Technology Center GmbH*. Per motivi di segretezza industriale, non è possibile mostrare il contenuto della mappa di efficienza.

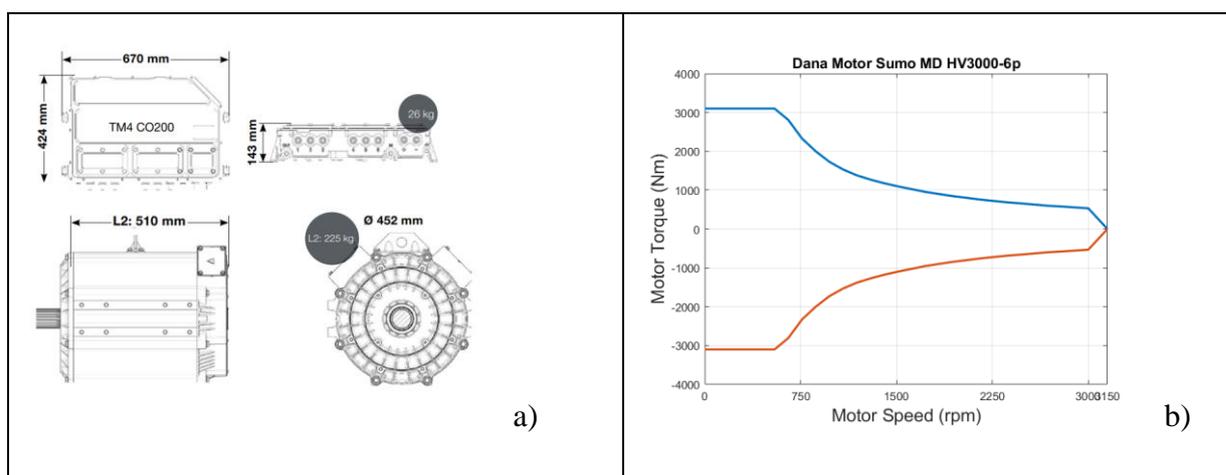


Figura 43: caratteristiche geometriche e prestazionali del Sumo MD HV3000-6p

Tabella 28: Dati di Targa Sumo MD HV3000-6p

Sumo MD HV3000-6p	
Inverter	TM4 CO200
Potenza di picco (kW)	235
Potenza continua (kW)	145
Coppia di picco (Nm)	3100
Coppia continua (Nm)	1055
Velocità massima (rpm)	3000
Massa inverter (kg)	26
Massa macchina elettrica (kg)	225

PARTE II

Materiali e Metodi

La Figura 44 confronta il valore di coppia massima del propulsore TM5035C con quella del Sumo MD HV3000-6p. Dal confronto si nota che le due motorizzazioni si equivalgono in velocità di rotazione e, superati i 700 rpm, anche in coppia. Solo nelle zone operative che riguardano velocità di rotazione inferiori a 700 rpm la macchina elettrica prodotta da Dana dispone di una coppia di picco superiore di circa il 24 % rispetto alla macchina elettrica prodotta da Jingjing. La maggior coppia prodotta dal propulsore Dana può essere un vantaggio prestazionale per il veicolo oggetto di studio. Considerando la massa del veicolo, aggiungendo la variabilità della massa dei passeggeri e considerando la probabilità di soste e partenze in tratte con pendenza variabile, la percentuale di coppia aggiuntiva può essere sfruttata per ben calibrare le accelerazioni del veicolo nelle condizioni appena citate.

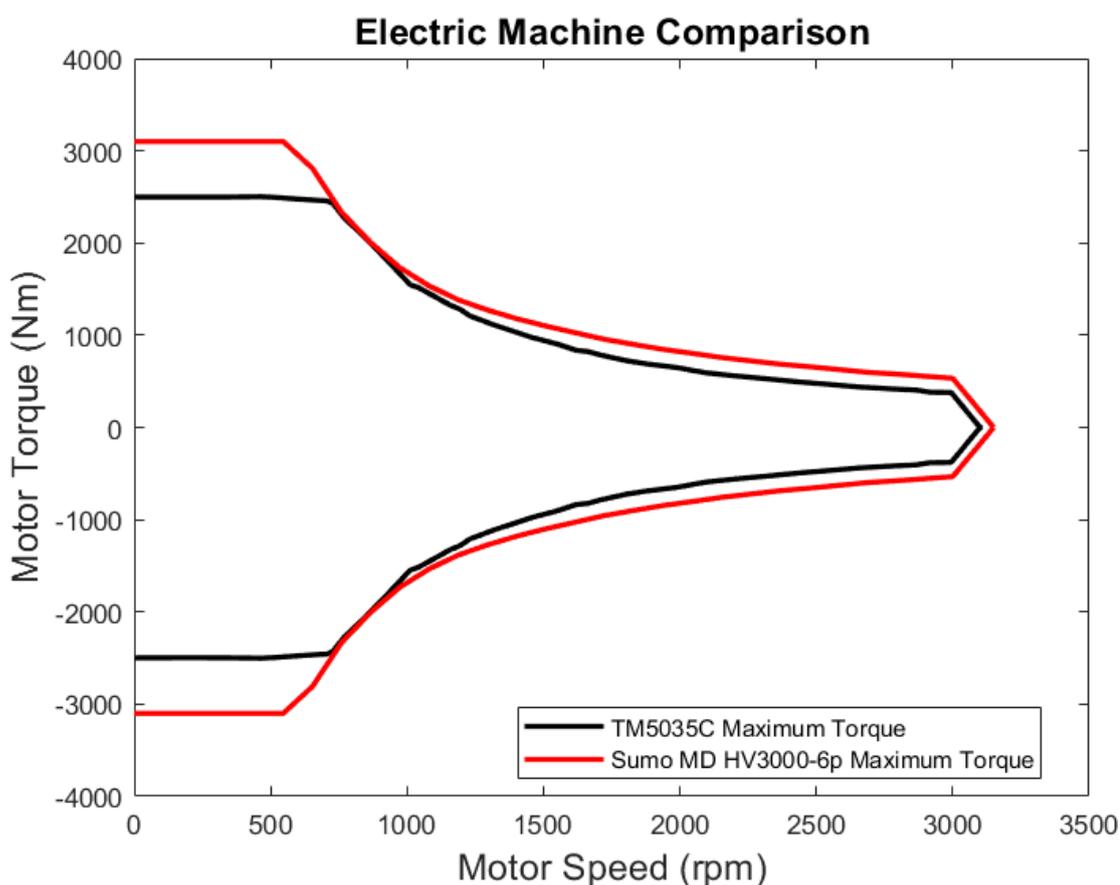


Figura 44: confronto curve caratteristiche TM5035C e Sumo MD HV3000-6p

Le masse e gli ingombri dei propulsori confermano l'appartenenza delle macchine elettriche alla stessa categoria. La differenza tra le masse ammonta a circa il 19% a sfavore del propulsore prodotto da JingJing, una variazione di massa comunque trascurabile se confrontata alla massa del veicolo e dei passeggeri. Confermata la tecnologia delle celle al litio come la più efficiente

PARTE II

Materiali e Metodi

dal punto di vista energetico, si sono ricondotte le simulazioni numeriche per quantificare la differenza prestazionale dei due motori, con la stessa metodologia affrontata precedentemente. La Tabella 29 riporta i risultati delle simulazioni.

Tabella 29: confronto prestazioni macchine elettriche

Parametro	Dana Sumo MD HV3000-6p	Jingjing TM5035C
Durata (s)	3990	3592
Distanza (km)	24.1	21.6
Velocità media (km/h)	21.74	21.64
Efficienza media (%)	80.4	72.7
N. cicli A/R	2.1	1.87

Validato il modello matematico che descrive il veicolo, e definita la componentistica che lo equipaggia, è possibile procedere con la progettazione del sistema di controllo ed alla definizione del modello dinamico per la valutazione delle performance energetiche del veicolo.

3. MODEL-BASED DESIGN PER LO SVILUPPO DEL SISTEMA DI CONTROLLO

I compiti svolti dal sistema di controllo di un veicolo ibrido possono essere raggruppati in due sottocategorie: il primo compito è il controllo a basso livello dei componenti, in cui ogni componente del gruppo propulsore viene controllato utilizzando i classici metodi di controllo di attuazione a retroazione. Il secondo compito, definito controllo di alto livello o controllo di supervisione, è responsabile dell'ottimizzazione del flusso di energia a bordo del veicolo, definendo le strategie operative e i comandi di attuazione per il controllo a basso livello. Questo livello di controllo, chiamato Energy Management System (EMS), riceve ed elabora le informazioni provenienti dal veicolo (e.g. velocità propulsori, livello di carica della batteria) e dal guidatore (e.g. stato acceleratore e freno) per definire il modo operativo da imporre al veicolo (e.g. trazione elettrica, trazione ibrida). Definito il modo operativo, il controllo di basso livello imporrà i segnali di comando ai componenti della trasmissione.

Lo sviluppo dell'algoritmo di controllo ha seguito un approccio Model-Based Design (MBD) e relativo ciclo a V. Il ciclo a V è estremamente diffuso nell'industria *automotive* perché permette di sviluppare un software di gestione seguendo dei passaggi obbligati, e tra loro correlati, che permettono il controllo e la verifica dello stato del software in maniera agevole e contestuale allo sviluppo. Rispetto al classico metodo di progettazione, che prevede la creazione del software direttamente usando il codice da implementare sull'hardware del veicolo, il ciclo a V presuppone l'utilizzo di strumenti software e hardware aggiuntivi che permettono di verificare il codice a partire dalla definizione dei requisiti. La "V" indica la struttura di questo modello, che confronta le fasi di sviluppo con le fasi di test corrispondenti. Il braccio sinistro della lettera V contiene gli obiettivi da raggiungere nella fase di sviluppo, mentre il braccio destro mostra le relative misure di test per verificare la qualità del prodotto sviluppato. La parte di sviluppo si divide generalmente in: fase di definizione dei requisiti, fase di modellazione e simulazione e si completa con la fase di coding. Le fasi di testing possono essere riassunte in test in modalità Model in the Loop (MIL), Software in the Loop (SIL) e Hardware in the Loop (HIL). Più nel dettaglio:

- 1) Definizione dei requisiti: secondo lo standard IEE-STD 1220-1998 (IEE 1998), per requisito si intende "Una dichiarazione che identifica una caratteristica o un vincolo operativo, funzionale o progettuale del prodotto o del processo, non ambigua, testabile o

PARTE II

Materiali e Metodi

misurabile e necessaria per l'accettabilità del prodotto o del processo (da parte dei consumatori o delle linee guida interne del controllo qualità)". Questa fase produce la documentazione che fornisce le basi operative per la fase di Modellazione e Simulazione.

- 2) **Modellazione e Simulazione:** questa fase comprende la modellazione della matematica di controllo sulla base della documentazione e dei requisiti definiti precedentemente. Questa fase può prevedere il supporto di parametri di input tempo varianti per testare le funzionalità del software ed il rispetto dei requisiti. In questo studio, per l'implementazione dei requisiti e dunque dello sviluppo del software, ci si è serviti delle potenzialità di Matlab/Simulink, un ambiente di diagrammi a blocchi utilizzato per progettare sistemi con modelli multi-dominio, effettuare simulazioni prima di passare al test sull'hardware senza dover necessariamente scrivere il codice.
- 3) **Coding:** Questa fase prevede la codifica della matematica sviluppata nella fase precedente in linguaggio di programmazione, compatibile con l'hardware (generalmente linguaggio C).
- 4) **Model in the Loop:** in questa fase di test sia la matematica di controllo che il sistema da controllare sono ospitati in ambiente di simulazione e modellati in maniera virtuale. Questa è la prima vera e propria fase di testing del controllo, che serve a definire se la matematica sviluppata rispetti i requisiti.
- 5) **Software in the Loop:** in questa fase di test la matematica che definisce il controllo è compilata nel linguaggio di programmazione che verrà implementato in centralina. Attraverso l'utilizzo di un compilatore è possibile, infatti, emulare l'hardware fisico che ospiterà il codice e verificare, se esistono, differenze tra la risposta del sistema di controllo modellato ed il codice generato.
- 6) **Hardware in the Loop:** per test HIL si intende una simulazione in tempo reale che consente di testare un codice embedded senza dover disporre di un sistema hardware dell'impianto da controllare. In questo modo è possibile testare condizioni anormali e di errore che possono danneggiare l'hardware se il codice in fase di sviluppo non funziona secondo le specifiche. In questo caso il codice è implementato nella centralina reale, mentre il modello del veicolo che simula il comportamento dello stesso è implementato in un controllore logico programmabile .

La Figura 45 mostra la relazione tra le varie fasi di sviluppo e la loro correlazione seguendo il ciclo a V del Model-Based Design.

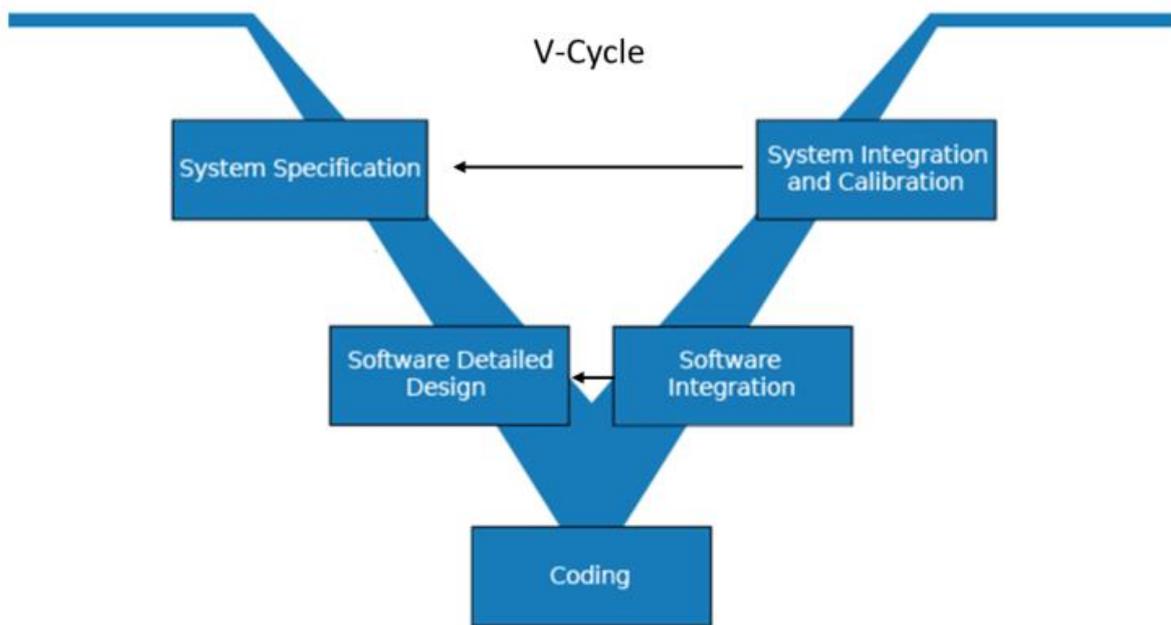


Figura 45: ciclo a V del Model Based Design per lo sviluppo del software

3.1. Definizione dei requisiti

Così come la classificazione dei compiti del software, anche i requisiti che stanno alla base della progettazione del sistema di controllo sono stati catalogati in requisiti di alto livello e requisiti di basso livello. In questo studio, si intendono per requisiti di alto livello la definizione degli obiettivi del sistema di controllo e le modalità operative che è necessario che il veicolo possa raggiungere (i.e. funzionamento in modalità elettrica o ibrida). Per requisiti di basso livello si intendono invece i vincoli che le variabili di controllo devono possedere durante l'applicazione di una determinata modalità operativa (i.e. coppia massima erogabile da un propulsore). Ad ogni requisito di alto livello saranno dunque legati uno o più requisiti di basso livello.

Requisito 1: modalità di funzionamento in Charge Depleting.

Quando lo stato di carica della batteria è superiore ad un livello di soglia predefinito (SOC_{opt}), il veicolo deve essere in grado di lavorare in modalità Charge Depleting, ossia la trazione deve essere affidata solo alla macchina elettrica. Questa fase operativa deve essere privilegiata rispetto a tutte le altre fasi operative, poiché, non coinvolgendo l'utilizzo del motore termico, è quella meno impattante in termini di consumi ed emissioni locali. In questa modalità di funzionamento è necessario che:

PARTE II

Materiali e Metodi

- a. La coppia richiesta alla macchina elettrica non ecceda i suoi limiti massimi e minimi;
- b. La potenza richiesta alla batteria non ecceda i suoi limiti massimi e minimi;
- c. La coppia richiesta al motore termico sia nulla e questo risulti spento;
- d. La frizione che collega motore termico e macchina elettrica non sia ingaggiata;
- e. La frizione che collega la macchina elettrica al cambio sia ingaggiata;

Requisito 2: modalità di funzionamento in Charge Sustaining.

Se lo stato di carica della batteria è inferiore ad un livello di soglia predefinito (SOC_{opt}), il veicolo deve essere in grado di lavorare in modalità Charge Sustaining. In questa modalità di funzionamento lo stato di carica della batteria può variare nell'intorno di SOC_{opt} , ma non raggiungere mai valori definiti critici (SOC_{min}). In modalità Charge Sustaining, che può prevedere l'utilizzo anche del motore termico, devono essere ottimizzate le fonti energetiche per limitare il più possibile l'emissione di agenti inquinanti ed il degrado degli accumulatori elettrochimici. In questa modalità di funzionamento è necessario che:

- a. La coppia richiesta alla macchina elettrica non ecceda i suoi limiti massimi e minimi;
- b. La potenza richiesta alla batteria non ecceda i suoi limiti massimi e minimi;
- c. La coppia richiesta al motore termico sia diversa dal valore nullo solo quando è richiesta trazione dal guidatore;
- d. La frizione che collega macchina elettrica e motore termico sia ingaggiata se la richiesta di coppia al motore termico è diversa dal valore nullo;
- e. La frizione che collega macchina elettrica e cambio sia ingaggiata;
- f. Che macchina elettrica e motore termico siano controllati da parametri di funzionamento che minimizzino il consumo di combustibile e limitino il fenomeno di decadimento della batteria.

Requisito 3: frenata rigenerativa.

il sistema di controllo deve essere in grado di gestire la macchina elettrica per permettere il recupero dell'energia cinetica del veicolo e trasformarla in energia di ricarica per le batterie. Il recupero di energia cinetica in frenata deve comunque garantire la sicurezza dei passeggeri e della componentistica installata a bordo del veicolo. Durante questa fase operativa è necessario che:

PARTE II

Materiali e Metodi

- a. La coppia richiesta alla macchina elettrica sia solo negativa e non inferiore ai suoi limiti minimi;
- b. La potenza di ricarica alla batteria non sia inferiore al suo limite minimo;
- c. La coppia richiesta al motore termico sia nulla;
- d. La frizione che collega macchina elettrica e motore termico non sia ingaggiata;
- e. La frizione che collega macchina elettrica e cambio sia ingaggiata;
- f. Tutta l'energia frenante richiesta dal guidatore deve essere fornita, e ripartita in maniera adeguata tra impianto frenante e macchina elettrica;
- g. Quando il veicolo si muove ad una velocità inferiore a 5 km/h, deve essere disattivata la frenata rigenerativa per evitare fenomeni di interazione con i sistemi di sicurezza dell'impianto frenante;
- h. Quando lo stato di carica della batteria è superiore al 90%, l'azione della frenata rigenerativa deve essere controllata per evitare fenomeni di sovraccarica della batteria;

Requisito 4: modalità di funzionamento Stationary Charging.

Il sistema di controllo deve essere in grado di gestire la modalità di ricarica stazionaria. Se richiesto dall'operatore, il sistema di controllo deve essere in grado di sfruttare i periodi di sosta per ricaricare le batterie tramite l'utilizzo del motore termico. Questa operazione deve essere effettuata in sicurezza sia per l'operatore che per i passeggeri del veicolo, ed essere attivata solo in condizioni critiche per lo stato di carica della batteria. In questa modalità di funzionamento è necessario che:

- a. La modalità venga attivata solo se richiesta dall'operatore;
- b. Se l'operatore richiede l'attivazione, per attuare la modalità è necessario che il veicolo sia fermo, con il comando di park inserito e trasmissione non ingaggiata;
- c. La potenza di ricarica non ecceda i limiti della batteria;
- d. La coppia richiesta al motore termico sia positiva e non superiore ai suoi limiti massimi;
- e. La coppia richiesta alla macchina elettrica sia negativa e non superiore, in valore assoluto, al limite massimo del motore termico;
- f. La frizione che collega macchina elettrica e motore termico sia ingaggiata.
- g. La frizione che collega macchina elettrica e cambio non sia ingaggiata;

Requisito 5: modalità di funzionamento Creep

Il sistema di controllo deve essere in grado di gestire la coppia di Creep, che deve essere erogata per simulare il comportamento di un convertitore di coppia, al fine di permettere all'autista di riscontrare le medesime condizioni operative sperimentate durante l'utilizzo dei veicoli del parco mezzi. La coppia di Creep deve essere erogata in condizioni di sicurezza per il guidatore ed i passeggeri. Per prevenire il consumo improprio di energia, deve essere erogata solo in condizioni adeguate dello stato di carica. Durante questa fase operativa è necessario che:

- a. La coppia richiesta alla macchina elettrica non sia superiore ad un valore definito $T_{creepMax}$;
- b. La coppia non deve in ogni caso permettere un'accelerazione del veicolo fino a velocità superiori a 5 km/h;
- c. La coppia richiesta alla macchina elettrica deve essere positiva e non superiore ai suoi limiti massimi;
- d. La potenza richiesta alla batteria non deve essere superiore ai suoi limiti massimi;
- e. La coppia richiesta al motore termico deve essere nulla;
- f. La frizione che collega macchina elettrica e motore termico deve essere non ingaggiata.
- g. La frizione che collega macchina elettrica e cambio sia ingaggiata;

Requisito 6: modalità di funzionamento Compression

Il sistema di controllo deve essere in grado di erogare una coppia, definita di Compression, per simulare il freno motore tipico dei veicoli con propulsione tradizionale. La coppia di Compression deve essere comandata in condizioni di sicurezza per il guidatore ed i passeggeri. In questa modalità di funzionamento è necessario che:

- a. La coppia richiesta alla macchina elettrica sia negativa e non inferiore ai suoi limiti minimi;
- b. La coppia di Compression si annulli a velocità prossime a 5 km/h ed eventualmente si riacordi alla coppia di Creep;
- c. La potenza richiesta alla batteria sia entro i limiti della stessa;
- d. La coppia richiesta al motore termico sia nulla;
- e. La frizione che collega macchina elettrica e motore termico sia non ingaggiata;
- f. La frizione che collega macchina elettrica e cambio sia ingaggiata.

3.2. Modellazione e Simulazione

L'analisi dei requisiti ha portato alla definizione del primo layout del software. Questo è composto da tre macchine a stati che definiscono i comandi alla propulsione quando il veicolo si trova in modalità Charge Depleting, Charge Sustaining o Stationary Charging. Ogni stato può o non permettere l'attuazione dalla modalità di Creep, di Compression o frenata rigenerativa, come mostrato in Figura 46. La transizione tra uno stato e l'altro dipende dai parametri di feedback provenienti dal veicolo e dalle costanti di calibrazione che saranno oggetto di ottimizzazione. I requisiti infatti prevedono non solo la possibilità di diverse modalità di funzionamento, ma anche l'ottimizzazione della gestione della propulsione in ognuna di queste modalità al fine di ottenere il miglior compromesso tra consumo di combustibile e degrado della batteria.

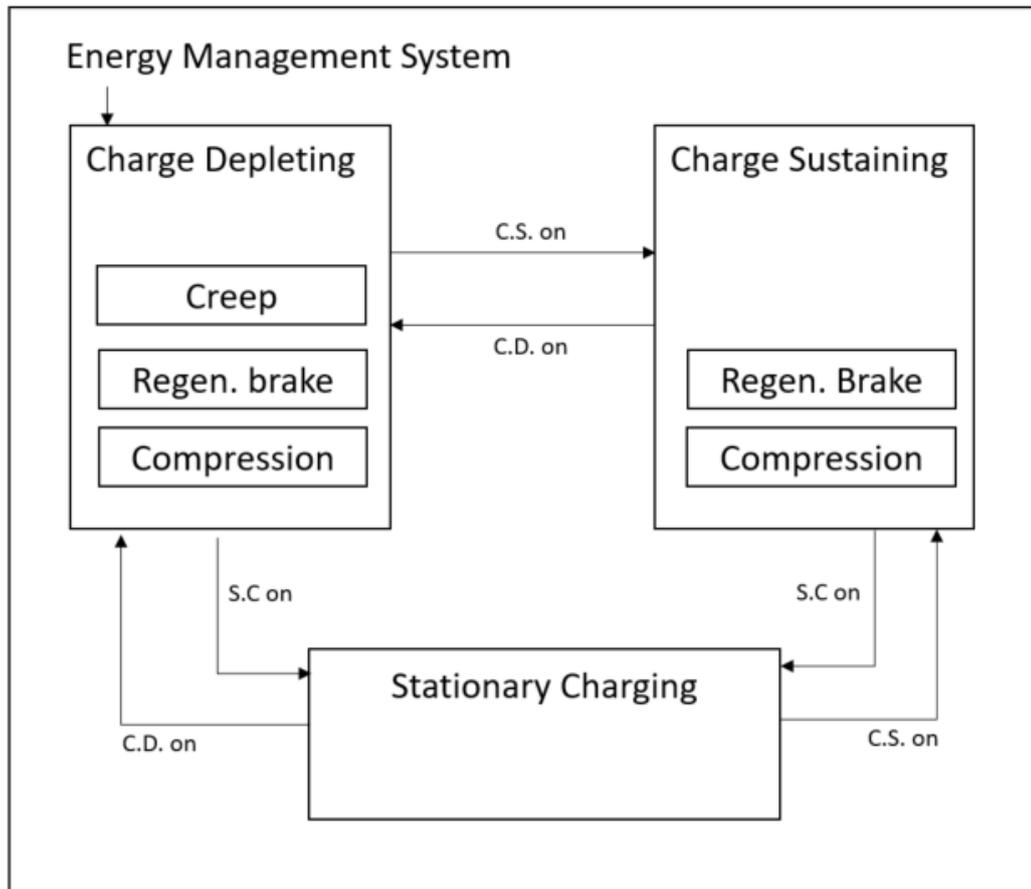


Figura 46: Layout del Sistema di Gestione Energetica

A prescindere dallo stato operativo, il sistema di controllo elabora gli input provenienti dal driver (posizione pedale acceleratore e freno) così come dal veicolo (velocità lineare, stato di carica

PARTE II

Materiali e Metodi

della batteria) per il calcolo di alcune grandezze di supporto. In particolare, per il calcolo della potenza richiesta dal driver sono state implementate le equazioni (3.1) e (3.2).

$$P_{cmd} = T_{cmd} \cdot \omega_p \quad (3.1)$$

$$T_{cmd} = Acc \cdot T_{EMmax}(\omega_p) \text{ con } 0 < Acc < 1 \quad (3.2)$$

La curva caratteristica del motore elettrico permette che il calcolo della 3.2 sia possibile anche a velocità nulle della trasmissione. La coppia massima della macchina elettrica viene quindi moltiplicata per la posizione del pedale acceleratore (Acc) normalizzato rispetto alla sua corsa massima per il calcolo della coppia richiesta (T_{cmd}) dal driver. Per la definizione dello stato di carica ottimale (SOC_{opt}), invece, si fa riferimento alle equazioni (3.3) e (3.4)

$$SOC_{opt} = SOC_{tgt} - \frac{\left(\frac{1}{2}v_{veh}^2 v_{mass} \eta_{chrg} \cdot k\right)}{Batt_{energy}} \quad (3.3)$$

$$Batt_{energy} = V \cdot Q_{batt} \cdot SOC \quad (3.4)$$

Il calcolo dell'energia della batteria è dato dal prodotto della tensione ai capi della batteria, della sua capacità e del valore dello stato di carica attuale. Il SOC_{opt} , riportato nell'equazione (3.3), rappresenta il valore di SOC attorno al quale il controllo tenderà a mantenere la batteria durante le condizioni di funzionamento in Charge Sustaining, come già anticipato nel requisito dedicato a questa modalità di funzionamento. Il calcolo del SOC_{opt} è basato sul SOC_{tgt} , parametro di calibrazione oggetto di ottimizzazione, e sul rapporto tra l'energia cinetica del veicolo e l'energia della batteria. In modalità di funzionamento non stazionarie, infatti, è possibile sfruttare la frenata rigenerativa per recuperare l'energia cinetica. La scelta di sottrarre al valore di SOC_{tgt} il rapporto tra le due energie permette di ammettere uno stato di carica più basso rispetto al valore di target, con la previsione di sfruttare il potenziale cinetico del veicolo per la ricarica del pacco batterie. I termine η_{chrg} è un fattore moltiplicativo compreso tra 0 e 1, oggetto di ottimizzazione, che definisce il contributo dell'energia cinetica nel calcolo del SOC_{tgt} , mentre k è il fattore di conversione per rendere adimensionale l'equazione. Definito il valore di SOC_{opt} , l'equazione (3.5) è utilizzata per calcolare la potenza di ricarica, $Chrg_{Pwr}$.

$$Chrg_{Pwr} = -Chrg_{fctr}(v_{veh}) \cdot (SOC_{opt} - SOC) \quad (3.5)$$

In cui $Chrg_{fctr}$ è una curva di potenza, funzione della velocità, che quantifica un'ideale potenza di ricarica. Il pedice "fctr" indica che non è l'effettiva potenza di ricarica, in quanto moltiplicata per il fattore dipendente dal SOC, come nell'equazione (3.5). $Chrg_{Pwr}$ verrà utilizzato per discriminare il passaggio tra lo stato di funzionamento da Charge Depleting a Charge Sustaining e viceversa, ed il suo valore sarà oggetto di ottimizzazione. Definite le variabili di supporto è possibile descrivere la matematica che è stata implementata in ogni modalità di funzionamento, così come le strategie per l'attivazione di una modalità piuttosto che un'altra.

Modalità di funzionamento: Charge Depleting.

Durante il funzionamento in modalità Charge Depleting solo la macchina elettrica è incaricata a sopperire alle richieste di potenza del driver. In questa modalità la richiesta di coppia al motore termico è nulla, viene forzato il suo spegnimento e viene inviato il comando di apertura frizione (clutch1 open). La frizione di innesto della trasmissione (clutch2) risulta essere ingaggiata. Se il veicolo non si trova in park o in marcia neutra, ed il segnale dell'acceleratore è diverso dal valore nullo, viene confrontata la potenza richiesta dal guidatore (equazione 3.1) con i limiti di potenza di scarica della batteria e viene valutata la minima tra le due potenze. Dal rapporto tra la potenza e la velocità della macchina elettrica è possibile valutare la coppia richiesta dal driver. La coppia richiesta dal driver viene allora confrontata la coppia di Creep, e alla macchina elettrica verrà richiesta la massima tra le due. Per velocità superiori a 5 km/h, se il segnale dell'acceleratore è pari al valore nullo, così come il segnale del pedale freno, la coppia richiesta alla macchina elettrica sarà pari alla coppia di Compression. Se il segnale del pedale freno risulta essere diverso da zero, alla macchina elettrica verrà invece richiesta la minima tra la coppia rigenerativa e la coppia di Compression. Il calcolo della coppia di Compression, di Creep e di Regen sarà discusso nei paragrafi dedicati. Le equazioni (3.6) e (3.7) descrivono le coppie richieste alla macchina elettrica nello stato di funzionamento in modalità Charge Sustaining.

$$T_{EM} = \max\left(T_{Creep}, \min\left(T_{drv}, T_{EMmax}, \frac{P_{BATT}}{\omega_p}\right)\right) \text{ se } ACC \geq 0 \quad (3.6)$$

$$T_{EM} = \min(T_{Compr}, T_{Regen}) \text{ se } Brk \geq 0 \quad (3.7)$$

Modalità di funzionamento: Charge Sustaining

Durante il funzionamento in Charge Sustaining, sia la macchina elettrica che il motore termico concorrono alla propulsione. Il sistema di controllo, se il park non è ingaggiato, la marcia non è in posizione neutra ed il segnale acceleratore non assume il valore nullo, comanda l'accensione del motore termico ed il comando di chiusura frizione che collega motore termico e macchina elettrica (clutch1). Alla macchina elettrica viene comandata una richiesta di coppia pari alla differenza tra la coppia erogata dal motore termico e quella richiesta dal driver. Se la coppia richiesta dal driver è superiore alla coppia erogata dal motore termico allora la macchina elettrica sopperirà alla mancanza, funzionando da motore e scaricando le batterie. Se la coppia richiesta dal driver è inferiore alla coppia erogata dal motore termico allora la macchina elettrica funzionerà da generatore e fornirà energia di ricarica alle batterie. Il calcolo della coppia richiesta alla macchina elettrica è riportato nell'equazione (3.8)

$$T_{EM} = T_{driver} - T_{ICE} \text{ con } ACC \geq 0 \quad (3.8)$$

La coppia erogata dal motore termico è funzione del pedale acceleratore ma non della coppia richiesta dal driver. Per il motore termico sono stati definiti i punti di coppia che dimostrano la miglior efficienza a parità di velocità di rotazione. L'involuzione di questi punti forma la curva di funzionamento ottima per il motore, cioè la curva che raccoglie i punti con la miglior efficienza. Quando il guidatore richiede coppie elevate è possibile che la coppia di ottimo non sia sufficiente alla trazione, forzando la macchina elettrica al funzionamento da motore e quindi causando una continua scarica della batteria. Per questo motivo alla curva di coppia "ottima" del motore è aggiunta la differenza tra il massimo della coppia della curva di ottimo e la curva di ottimo stessa. Questa differenza è moltiplicata per il valore del comando acceleratore ed è aggiunta ai punti di coppia solo se l'acceleratore supera un valore di soglia del 20%, come riportato nelle equazioni (3.9) e (3.10).

$$\begin{aligned} T_{ICE} &= T_{ICEopt}(\omega_{ICE}) & Acc < Acc_{th} \\ T_{ICE} &= T_{ICEopt}(\omega_{ICE}) + Acc \cdot (T_{optmax} - T_{ICEopt}(\omega_{ICE})) & Acc \geq Acc_{th} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$0 \leq T_{ICE}(\omega_{ICE}) \leq T_{ICE \max}(\omega_{ICE}) \quad (3.10)$$

La Figura 47 mostra la variazione dei punti operativi del motore in funzione del valore del pedale acceleratore e della velocità di rotazione del motore.

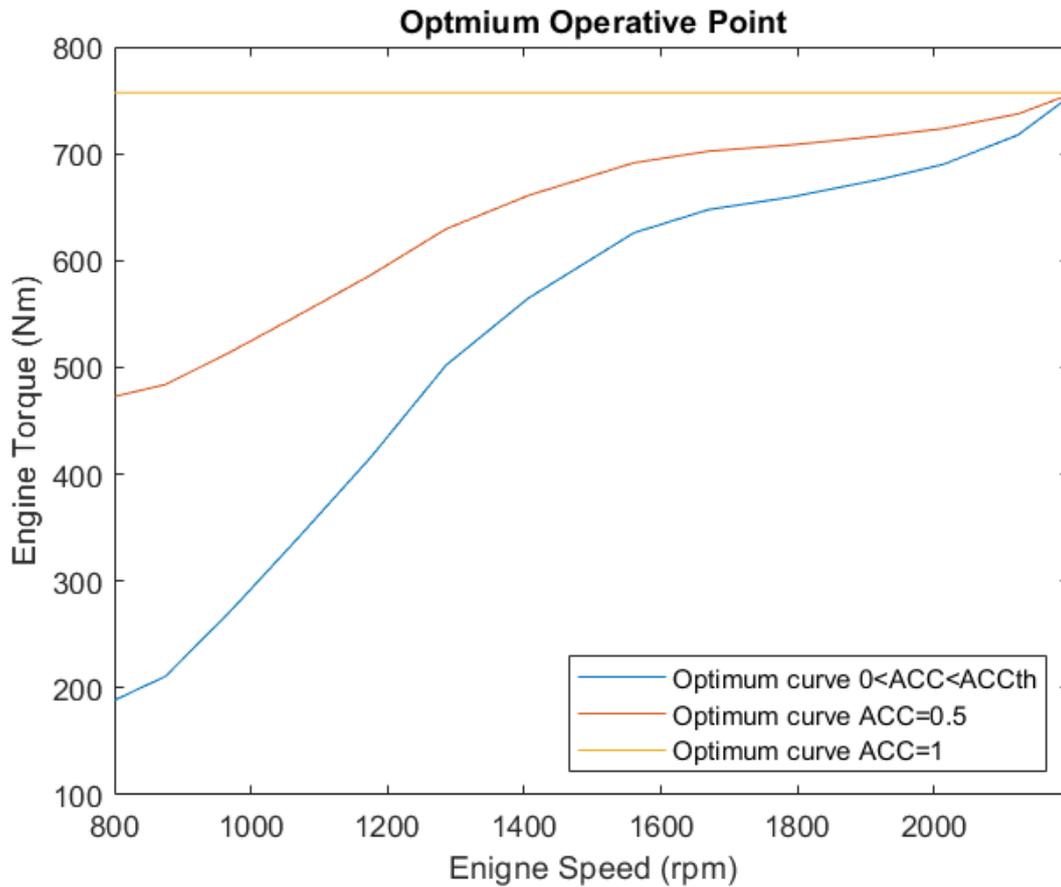


Figura 47: Coppia richiesta al motore termico durante il funzionamento in modalità Charge Sustaining

Il passaggio di stato tra modalità Charge Depleting a Charge Sustaining è determinato dall'attivazione o disattivazione del parametro interno CS_{on} . Il valore del parametro dipende dalla potenza richiesta dal driver (eq. 3.1), dalla potenza di ricarica (eq 3.5) e dalla potenza di attivazione. La potenza di attivazione è la potenza che definisce il limite massimo ammissibile tra la somma della potenza di ricarica e la potenza richiesta dal driver. Alla potenza richiesta dal driver viene sottratta la potenza di ricarica e la potenza di attivazione. Quando questa differenza restituisce un valore maggiore o uguale a zero significa che la somma tra la potenza richiesta dal driver e quella di ricarica ha superato il valore di soglia di attivazione ed è quindi necessario

PARTE II

Materiali e Metodi

attivare la modalità Charge Sustaining. La modalità rimarrà attiva fin quando la potenza di ricarica non avrà eguagliato la potenza richiesta dal driver. La potenza di ricarica è tanto più negativa tanto quanto il SOC della batteria è inferiore al SOC_{opt} , ed è tanto più positiva tanto quanto il SOC della batteria è superiore al SOC_{opt} . Alte potenze richieste dal driver non comportano necessariamente una richiesta di attivazione quando il SOC della batteria è molto maggiore rispetto al SOC_{opt} , viceversa anche basse potenze del driver possono comportare una richiesta di attivazione quando il SOC è molto minore rispetto al SOC_{opt} . Il valore della potenza di attivazione è espresso nell'equazione (3.11)

$$Act_{pwr} = ACC \cdot K_{act} \text{ con } 0.5 \leq ACC \leq 1 \quad (3.11)$$

La scelta di far dipendere il valore della potenza di attivazione dal segnale dell'acceleratore nasce dall'esigenza di controllare la variazione di stato in situazioni che possano coinvolgere alti rate di variazione del pedale stesso. In percorsi urbani è possibile che il driver agisca premendo completamente, o quasi, il pedale dell'acceleratore per effettuare partenze in salita o raggiungere le velocità di crociera. In questa fase è preferibile evitare cambiamenti di funzionamento della propulsione e garantire un comportamento omogeneo del veicolo, considerando che la macchina elettrica è anche la più adatta ed efficiente in partenze da fermo. Facendo dipendere la potenza di attivazione dal pedale acceleratore è possibile mitigare il passaggio alla modalità Charge Sustaining a causa di brevi impulsi di potenza. Per la definizione dei parametri ci si è basati su considerazioni legate alla potenza dei propulsori e della possibile richiesta del driver. Per evitare che lo stato di carica della batteria possa assumere dei valori eccessivamente distanti dai valori di ottimo, è necessario che il sistema di controllo attivi la modalità Charge Sustaining quando le richieste di potenza da parte del driver sono vicine ai limiti massimi. In prima approssimazione, è richiesta l'attivazione della modalità Charge Sustaining quando lo stato di carica della batteria è inferiore del 20% dello stato di carica ottimo e quando la potenza richiesta dal driver, più un terzo della massima potenza erogabile dalla macchina elettrica, superano la media tra la potenza nominale e di spunto della macchina elettrica alla massima velocità di crociera urbana, con pedale acceleratore pari al 75%. Il valore di $Chrg_{fctr}$ è stato definito tramite una mappa funzione della velocità, come mostrato in Figura 48.

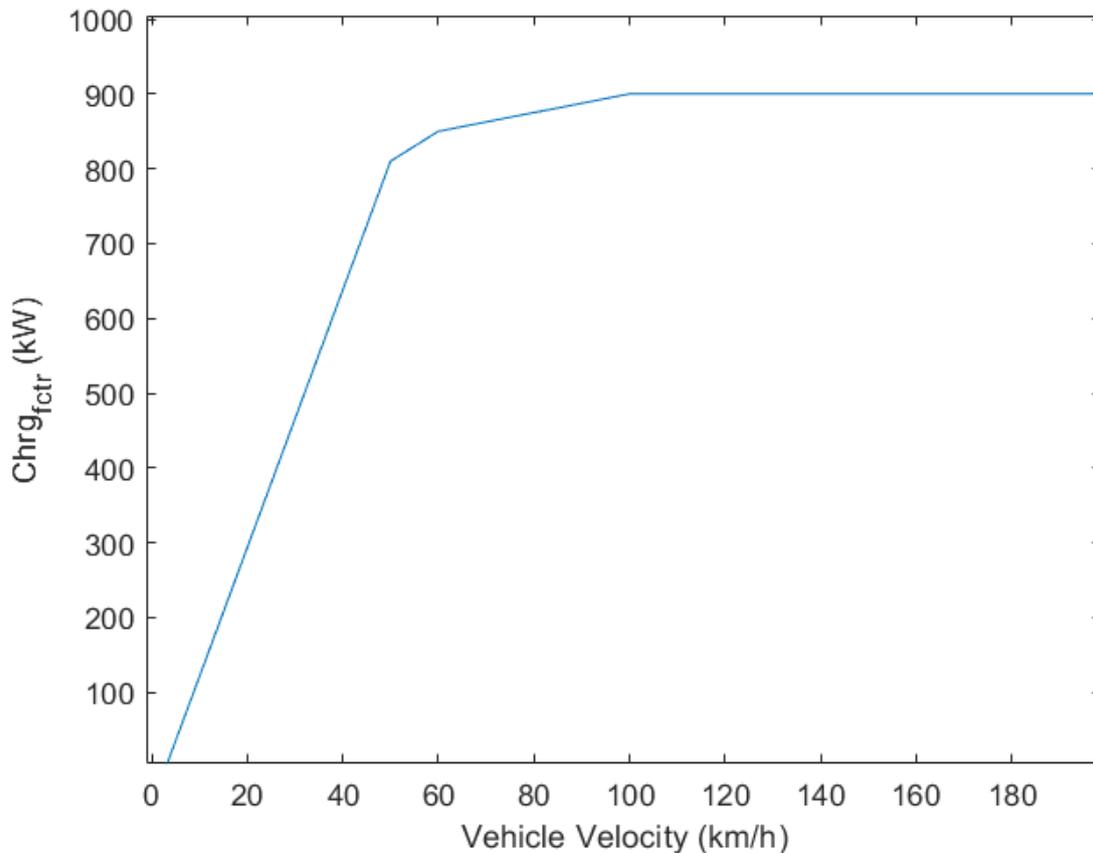


Figura 48: dipendenza del $Chrg_{fctr}$ dalla velocità lineare del veicolo

Per velocità inferiori a 3km/h $Chrg_{fctr}$ è pari a zero, per evitare l'attivazione del motore termico durante le soste del veicolo. Il $Chrg_{fctr}$ poi cresce linearmente fino a circa 810kW in prossimità di 50 km/h, ossia il limite di velocità in strade urbane. Immaginando un SOC_{opt} di 50%, e considerata l'equazione (3.5), in queste condizioni $Chrg_{Pwr}$ assume il valore di 81kW, ossia un terzo della potenza di spunto della macchina elettrica. Considerando i rapporti di trasmissione del veicolo, la velocità di 50km/h, ed il valore del pedale acceleratore, la richiesta del driver in queste condizioni sarà circa 128 kW. Dall' eq. (3.11) si ricava il valore di Act_{pwr} , ossia 278 kW. Queste considerazioni sono state fatte per definire un ordine di grandezza ai parametri Act_{pwr} , $Chrg_{fctr}$, SOC_{trgt} e η_{chrg} , che saranno comunque oggetto di ottimizzazione.

Modalità di funzionamento: Ricarica Stazionaria

La modalità di ricarica stazionaria è attivabile solo sotto richiesta del guidatore. Alla ricezione del comando di attivazione viene verificato l'inserimento del park e che il pedale acceleratore non sia premuto. Se vengono rispettate le condizioni di attivazione viene inviato il comando di

PARTE II

Materiali e Metodi

ingaggio della frizione 1 e contestualmente il comando di disingaggio della frizione 2. Se il SOC della batteria ha un valore inferiore al SOC_{trgt} il controllo agisce richiedendo la potenza di ricarica definita dell'equazione (3.12)

$$SR_{pwr} = \frac{Batt_{rechpwr}(SOC)}{3} \quad opt_{ICEpwr}(\min) \leq SR_{pwr} \leq opt_{ICEpwr}(\max) \quad (3.12)$$

In cui SR_{pwr} rappresenta la potenza di ricarica richiesta alla propulsione, che è pari ad un terzo della potenza massima di ricarica ammessa dalla batteria allo stato di carica attuale. Si noti che la potenza richiesta è saturata tra il valore minimo e massimo della potenza ottima del motore termico. La curva di potenza ottima del motore termico è stata valutata moltiplicando le coppie di funzionamento ottimo del motore termico per la velocità di rotazione corrispondente. In questo modo, per ogni valore di potenza contenuto in questa curva, è possibile associare un valore di velocità di rotazione e una coppia da richiedere al motore termico, come mostrato in Figura 49. Nota la potenza di ricarica richiesta è quindi possibile, tramite l'azione del motore elettrico, forzare il motore termico a lavorare nei punti di lavoro ottimi. La macchina elettrica ad esso collegato agirà sostanzialmente da freno elettrico, trasformando l'energia prodotta dal motore in energia di ricarica per le batterie. Il processo di ricarica rimarrà attivo fin quando non verrà raggiunto il SOC_{trgt} o fin quando il guidatore non agirà sui comandi per disattivare la funzione.

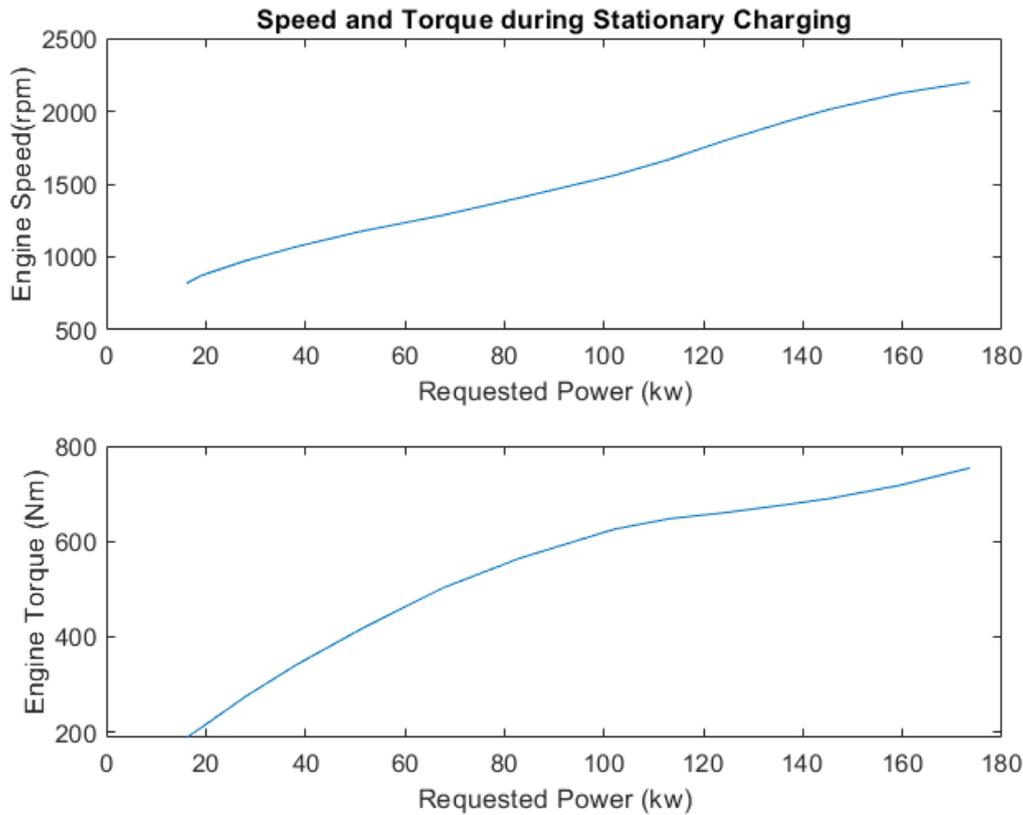


Figura 49: Punti di funzionamento durante la modalità di Stationary Charging

Modalità di funzionamento: Frenata Rigenerativa

La frenata rigenerativa permette di recuperare l'energia cinetica del veicolo per trasformarla in energia di ricarica per le batterie. Questa modalità di funzionamento è permessa sia in modalità Charge Sustaining che in modalità Charge Depleting. Quando il pedale dell'acceleratore è rilasciato ed il pedale freno è premuto, il sistema di controllo definisce la richiesta di coppia tramite l'equazione (1.14), in cui il valore di pressione è definita dall'equazione (3.13)

$$p_{brake} = Brk_{pdl} \cdot p_{brakemax} \quad (3.13)$$

P_{brake} è la pressione esercitata sui freni (Pa), Brk_{pdl} è il valore della corsa del pedale freno normalizzata rispetto al suo valore massimo e $p_{brakemax}$ è la massima pressione esercitabile dalla pompa idraulica che pressurizza l'impianto frenante (Pa). Nota la coppia frenante richiesta al nodo freno, è possibile confrontarla con la massima coppia frenante che il motore elettrico può esercitare sul veicolo. Se la massima coppia frenante del motore elettrico non è sufficiente a

PARTE II

Materiali e Metodi

sopperire alla richiesta del driver, la coppia rimanente verrà richiesta al nodo freno che azionerà il sistema idraulico per sopperire alla mancanza di coppia. La massima coppia disponibile per la frenata rigenerativa è limitata dall'azione di due mappe che definiscono dei coefficienti di correzione della coppia disponibile in funzione dello stato di carica della batteria e della velocità del veicolo. Per evitare fenomeni di sovraccarica della batteria, non è possibile sfruttare la frenata rigenerativa con valori di SOC superiori al 95%, tutta la coppia di ricarica sarà disponibile per valori di SOC inferiori al 90%, come mostrato in Figura 50.

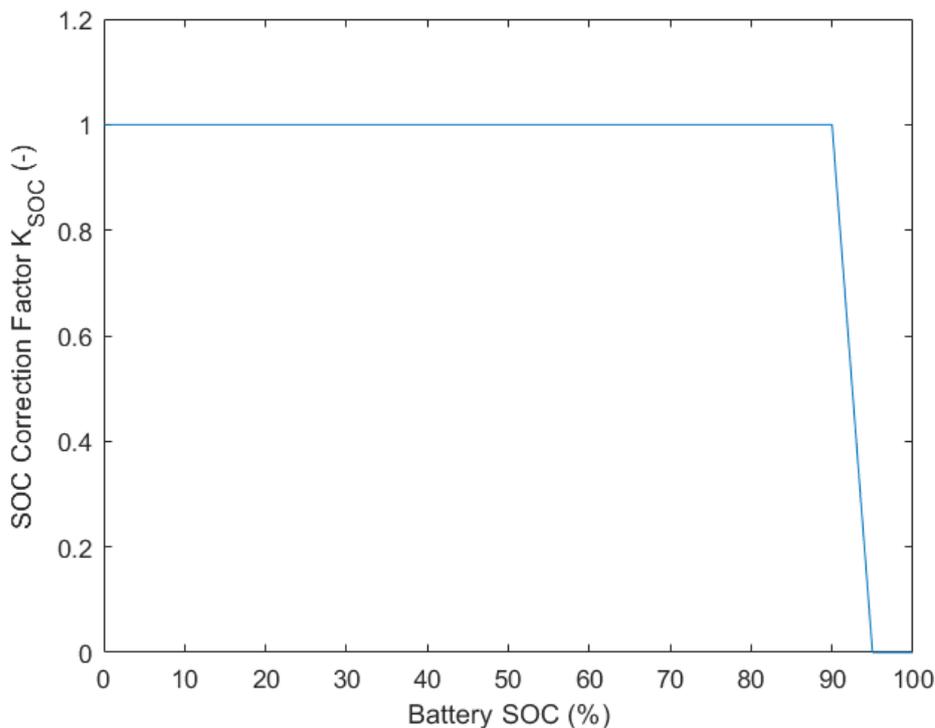


Figura 50: coefficiente di correzione della frenata rigenerativa in relazione al SOC della batteria

Per velocità inferiori a 5 km/h non è ammessa la frenata rigenerativa, mentre la coppia disponibile non è più limitata per velocità superiori a 10 km/h, come mostrato in Figura 51. Questo permette al motore elettrico di non interferire sui sistemi di sicurezza legati al funzionamento dell'impianto frenante, come l'ABS, e di limitare lo stress sugli assali. La coppia frenante richiesta alla macchina elettrica è dunque valutata tramite l'equazione (3.14), mentre la coppia richiesta all'impianto frenante è espressa dalla (3.15)

$$T_{EM_{regen}} = (\min(M_b, T_{EM_{min}} \cdot \tau_i \cdot \tau_s)) \cdot k_{SOC} \cdot k_{vel} \quad (3.14)$$

$$T_{brake} = M_b - T_{EM_{regen}} \quad (3.15)$$

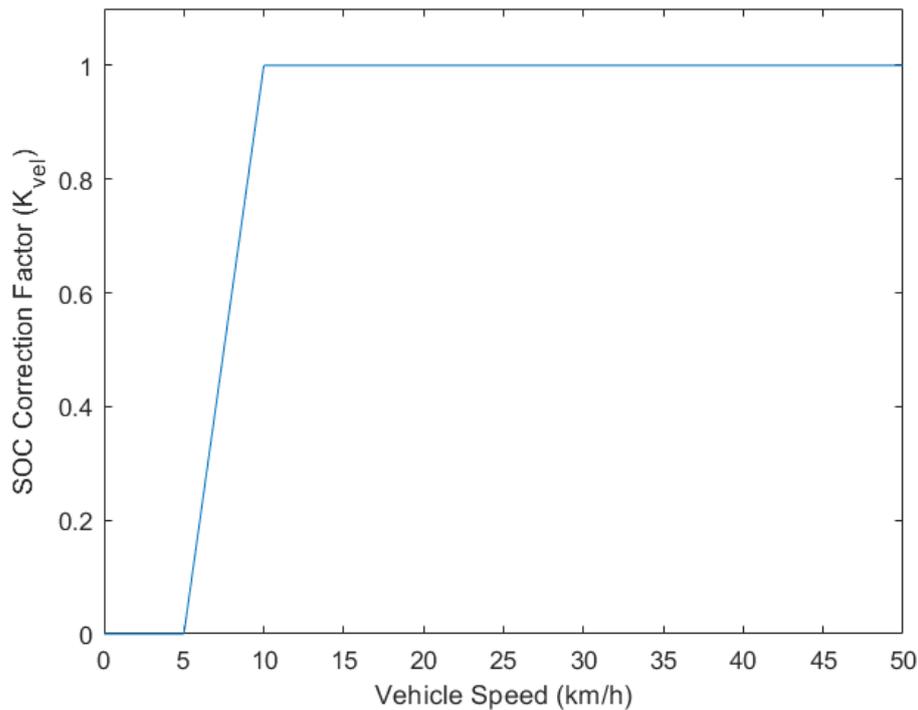


Figura 51:coefficiente di correzione della frenata rigenerativa in relazione alla velocità veicolo

Modalità di funzionamento: Creep Torque

Come da requisito è stata implementata la logica di controllo della coppia di Creep. Le condizioni necessarie affinché si attivi la modalità di avanzamento in Creep sono:

1. Il veicolo si trova in modalità di funzionamento Charge Depleting;
2. Il freno non risulta essere premuto;
3. La velocità del veicolo è inferiore a 5 km/h;

Sotto questa condizioni è disponibile la coppia di Creep. Il calcolo di tale coppia segue l'equazione (3.16)

$$T_{creep} = T_{creepmax} \cdot \left(\frac{v_{creepmax} - v_{veh}}{v_{creepmax} - v_{creepstart}} \right) \quad (3.16)$$

Nell'equazione 3.16, T_{creep} rappresenta l'effettiva coppia richiesta al motore elettrico dal controllo (Nm), $T_{creepmax}$ rappresenta la massima coppia disponibile per il Creep (Nm), $v_{creepmax}$ è il valore massimo consentito per l'attuazione della coppia di Creep (5 km/h), $v_{creepstart}$ è il valore di velocità in cui inizia la limitazione della coppia e v_{veh} è la velocità veicolo (km/h). La differenza tra $v_{creepmax}$ e v_{veh} non può essere inferiore a zero. La coppia effettivamente erogata dal controllo sarà la massima tra la coppia di Creep e la coppia richiesta al motore in modalità Charge Depleting, come da equazione (3.17)

$$T_{EM} = \max(T_{creep}, T_{drv}) \quad (3.17)$$

Modalità di funzionamento: Compression Torque

La coppia di Compression serve a riprodurre l'effetto della coppia negativa che viene sperimentata durante l'utilizzo di un motore termico su un veicolo, ossia la coppia di freno motore. Vista la configurazione dell'unità di propulsione del veicolo e le attuazioni del sistema di controllo non è consentito che il motore termico possa causare determinati effetti sulla trasmissione. Per rispettare i requisiti e per trasmettere le sensazioni di una guida classica al driver, è stata implementata una logica di controllo capace di attuare una coppia rigenerativa, e quindi frenante per il veicolo, quando il pedale del gas è rilasciato. In particolare, la coppia di Compression può essere presente solo in condizioni di Charge Sustaining e Charge Depleting. In queste condizioni la coppia di Compression è calcolata tramite l'equazione (3.18)

$$T_{compr} = -T_{comprmax} \cdot \left(1 - \frac{\omega_{EMmax} - \omega_p}{\omega_{EMmax} - \omega_{ICEidle}} \right) \cdot k_{SOC} \cdot k_{vel} \quad (3.18)$$

Nell'equazione (3.18), ω_{EMmax} è la massima velocità di rotazione della macchina elettrica (rpm), ω_p è la velocità di rotazione dell'albero motore (rpm) e $\omega_{ICEidle}$ è la velocità minima del motore a combustione interna (rpm). Nell'equazione (3.18), il valore di ω_p è saturato inferiormente al valore di $\omega_{ICEidle}$, cosicché la coppia risulti essere nulla quando la macchina elettrica ruota con velocità pari o inferiori a $\omega_{ICEidle}$; se non esistono altre forzanti esterne, il

PARTE II

Materiali e Metodi

driver avrà una sensazione di rilascio frizione essendo il veicolo in *Free Rolling*. L'effettiva coppia sperimentata del veicolo comunque dipenderà dal valore della corsa del pedale freno. La richiesta alla macchina elettrica è la coppia minima tra la coppia di Compression e la coppia di frenata rigenerativa, come riportato nell'equazione (3.19).

$$T_{regen} = \min (T_{compr}, T_{regenbrake}) \quad (3.19)$$

Come la coppia di frenata rigenerativa, anche la coppia di Compression è forzata al valore nullo seguendo le mappe di limitazione riportate in Figura 50 e Figura 51.

Definita la matematica che descrive il sistema di controllo, ci si è quindi concentrati sulla procedura di ottimizzazione dei parametri. L'ottimizzazione è stata svolta in ambiente Matlab/Simulink, utilizzando il metodo di ottimizzazione "Pattern Search" con base massima (2N). Per poter procedere con l'ottimizzazione è necessario definire il set di parametri da ottimizzare e la funzione obiettivo. Il set di parametri è già noto dall'analisi dei requisiti, così come sono note le funzioni obiettivo (minimizzazione consumi equivalenti e fenomeni di degrado). La correlazione tra parametri e obiettivi viene descritta dall'insieme di equazioni che definiscono il sistema di gestione energetica e le dinamiche del veicolo. È stato quindi necessario creare un modello simulativo in grado di valutare le funzioni obiettivo e l'influenza delle variabili. Il modello simulativo segue un approccio dinamico, sfruttando le equazioni già descritte nel capitolo 1. È già noto che nella modellazione dinamica i parametri di input sono i segnali che il guidatore può comandare al veicolo (generalmente quelli provenienti dal freno, dall'acceleratore ed eventualmente la marcia da ingaggiare), ed in generale tutti i parametri di input all'autovettura provenienti dal mondo esterno. I segnali di comando del guidatore possono essere registrati durante cicli di guida reali e riutilizzati in simulazione, possono essere definiti dei segnali appositi per l'analisi di alcune funzionalità del veicolo o si può utilizzare un'ulteriore funzione di controllo per simulare il comportamento di un guidatore nello svolgimento di una specifica missione. Per le simulazioni di ottimizzazione è stato utilizzato quest'ultimo approccio, ossia è stata implementata una funzione che simula il guidatore virtuale in grado di fornire i segnali di acceleratore e freno con lo scopo di far seguire al veicolo un determinato profilo di velocità.

Lo scopo dell'ottimizzazione è infatti definire quali parametri di calibrazione massimizzino l'efficienza dell'uso combinato delle fonti energetiche in termini di consumo di combustibile (e

PARTE II

Materiali e Metodi

conseguenti emissioni inquinanti dirette) e contestualmente, minimizzino l'uso intensivo della batteria; è quindi necessario trovare un compromesso tra consumo di combustibile e degrado della batteria. Mentre per il degrado della batteria si può fare riferimento all'equazione (1.60) presentate nel capitolo 1, il consumo di combustibile non è direttamente deducibile dall'equazione (1.27). l'equazione (1.27) fa riferimento al solo combustibile utilizzato dal motore termico, senza considerare l'effetto della propulsione elettrica sul consumo. Il consumo di combustibile da minimizzare sarà quindi dato dalla somma del combustibile realmente consumato dal motore termico e da un consumo elettrico equivalente, ossia un consumo fittizio nato dalla conversione del potenza elettrica della batteria in litri di carburante.

Le prestazioni energetiche di un veicolo sono strettamente legate al suo utilizzo, e quindi al conseguente profilo di velocità. Sono state create diverse procedure di valutazione delle prestazioni energetiche che fanno riferimento a dei test standard, da eseguire sotto determinate condizioni di carico, per permettere un confronto diretto tra prestazioni di veicoli differenti. Solitamente per i veicoli di questa categoria vengono testati solo i motori a combustione interna tramite l'utilizzo di banchi prova motori, capaci di imporre determinate condizioni di lavoro al motore oggetto di test. Alcune di queste procedure, sviluppate da università o centri di ricerca, fanno riferimento anche a dei profili di velocità normati ed utilizzati per il confronto delle prestazioni energetiche. Nelle simulazioni svolte con l'obiettivo di ottimizzare l'efficienza energetica, verrà imposto al driver virtuale di replicare i profili di velocità standard per ottenere un riferimento rispetto ai veicoli della stessa categoria.

Nelle pagine che seguono verranno quindi presentati i profili di velocità standardizzati eseguiti durante le procedure di ottimizzazione. Verrà introdotta la funzione che simula il comportamento del driver, così come il sistema di controllo del cambio marcia. Verrà analizzata la valutazione del consumo equivalente ed infine condotte le simulazioni per la definizione dei parametri che ottimizzino la gestione dell'unità di potenza, ossia che minimizzino i consumi equivalenti e l'utilizzo intensivo della batteria.

3.2.1. I Cicli di Guida di Standardizzati

Con l'aggiornarsi delle norme antinquinamento, è nata la necessità di creare delle procedure standardizzate per la valutazione delle prestazioni e delle emissioni dei veicoli commercializzati. Le procedure per valutazione delle emissioni e dei consumi dipendono sia dalla tipologia di veicolo sottoposto a test sia dal paese a cui è destinato. Per la mobilità urbana, in particolare per

PARTE II

Materiali e Metodi

la valutazione delle prestazioni degli autobus, l'Associazione Internazionale del Trasporto Pubblico (UITP) ha proposto la metodologia di test ad oggi più diffusa. Dal 2004, l'UITP sta elaborando e aggiornando un protocollo standardizzato, con l'obiettivo di confrontare il consumo energetico degli autobus. Nato per gli autobus diesel da 12 metri, è stato gradualmente esteso ad autobus di varie dimensioni (dai mid-bus ai veicoli articolati o a due piani) ed alimentati con diverse tecnologie (motore termico, motore elettrico o propulsione ibrida). Chiamato "SORT" (per "Standardized On Road Testcycle"), questo protocollo è ormai ben noto nel settore del trasporto pubblico. Questa metodologia è il risultato di una collaborazione tra operatori, impianti di prova, produttori di autobus e di cambi. La metodologia SORT definisce tre diversi cicli di guida, ognuno dei quali corrisponde a una tipica velocità commerciale (12, 18 e 25 km/h).

Secondo l'UITP, tramite l'applicazione del protocollo SORT:

- Per ogni specifica condizione di funzionamento, è possibile prevedere un consumo realistico una combinazione appropriata di 1 o 3 consumi SORT.
- La procedura di test può essere eseguita "in casa" o da un impianto di prova indipendente. In caso di misurazione interna, la parte interessata ha la facoltà di richiedere una controprova prima o dopo la consegna dell'autobus. Questi dati saranno validi per rispondere a ogni gara d'appalto riferita ai cicli SORT.
- Se la velocità commerciale della tratta non corrisponde a nessuna di quelle tipiche dei tre cicli del SORT, è possibile calcolare un media pesata dei consumi valutati considerando la velocità commerciale dei cicli eseguiti.
- La procedura deve essere svolta considerando solo i carichi strettamente necessari al funzionamento del veicolo.
- La procedura può essere applicata a veicoli con propulsione elettrica o ibrida, in questo caso prende il nome di E-SORT.

Nel caso ci si approcci alla procedura per la valutazione dell'autonomia in modalità zero emissioni, e quindi con una trazione puramente elettrica, il protocollo prevede quanto segue:

- 1) Valutare la massima energia disponibile alle fonti energetiche, nel caso di un accumulatore elettrochimico ci si riferisce all'energia valutata tra il valore massimo del SOC e quello minimo ammesso dal sistema di gestione energetica o dall'accumulatore stesso (E_{max}).
- 2) Valutare l'energia effettivamente spesa durante l'esecuzione dell'*i*-esimo ciclo standardizzato (E_i)

PARTE II

Materiali e Metodi

- 3) Misurare la distanza effettivamente percorsa durante l'esecuzione dell'i-esimo ciclo (d_i)
- 4) Calcolare il consumo energetico dell'i-esimo ciclo, come rapporto percentuale tra l'energia spesa e la distanza percorsa (c_i), come riportato nell'equazione (3.20) .

$$c_i = 100 \cdot \frac{E_i}{d_i} \quad (3.20)$$

- 5) Calcolare la massima distanza percorribile in modalità zero emissioni come rapporto percentuale tra la massima energia disponibile e consumo energetico dell'i-esimo ciclo, come riportato nell'equazione (3.21).

$$d_{imax} = 100 \cdot \frac{E_{max}}{c_i} \quad (3.21)$$

In maniera più generale, si può assumere che i tre cicli SORT rappresentano le categorie di traffico indicate:

- SORT 1 traffico dei centri urbani – Alta intensità di traffico
- SORT 2 traffico nei confini urbani – Media intensità di traffico
- SORT 3 traffico nei percorsi extraurbani – Bassa intensità di traffico

Ognuno dei tre cicli è composto da tre profili di velocità trapezoidali intervallati da istanti di tempo in *standstill*. La velocità massima, come l'accelerazione, raggiunta per ogni short trip dipende dal ciclo considerato. I parametri che caratterizzano i tre cicli di SORT sono riportati in Tabella 30, mentre la Figura 52 mostra l'evoluzione dei profili di velocità nel tempo.

PARTE II

Materiali e Metodi

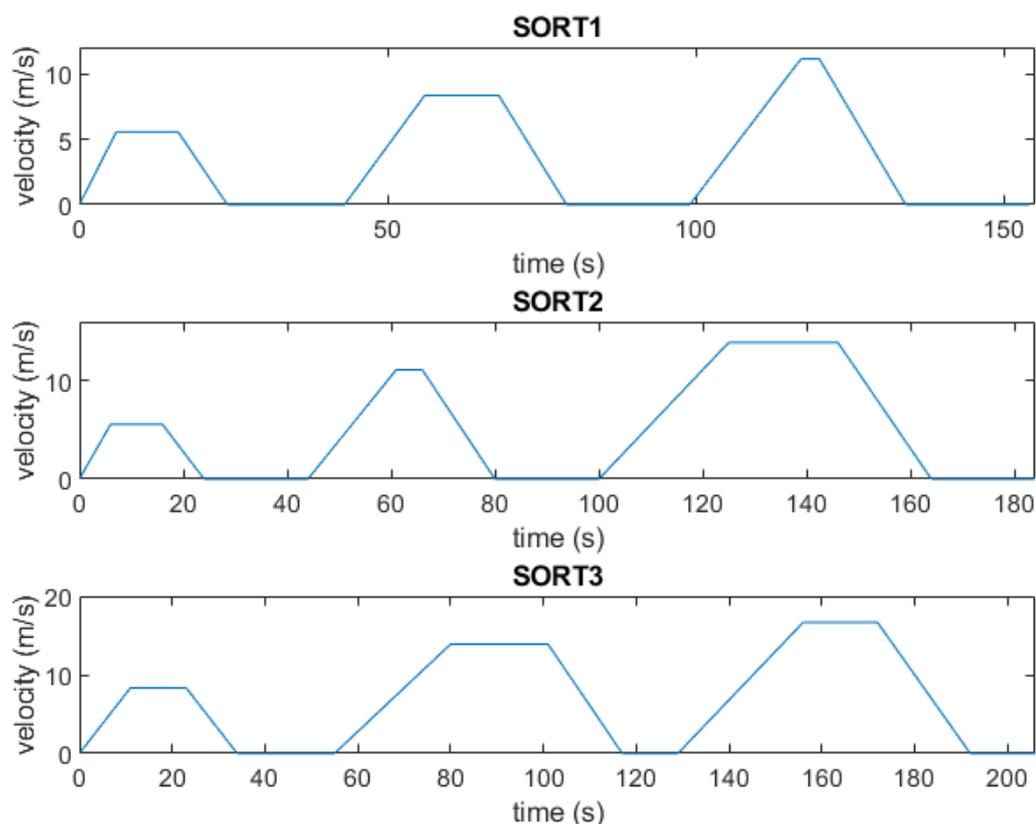


Figura 52: profili di velocità dei cicli SORT

Tabella 30: Caratteristiche cinetiche dei cicli SORT

	SORT1	SORT2	SORT3
Tempo (s)	154.5	183.9	206.2
Distanza (km)	0.52	0.92	1.45
Velocità Max (km/h)	40	50	60
Velocità Media (km/h)	12.11	17.85	24.84
Velocità Media guidata (km/h)	19.60	26.71	32.83
Numero di stop/km	5.76	3.26	2.06

La procedura di validazione definita dall'UITP non è l'unica accettata a livello internazionale. Sono state sviluppate infatti altre procedure che coinvolgono profili di velocità differenti, in grado di coprire un range di velocità commerciali compreso tra circa 12 km/h fino a circa 46 km/h. Solitamente i cicli di guida prendono il nome dalla città, dall'università o centro di ricerca che lo ha sviluppato. In Europa, oltre il SORT, non sono regolamentati altri cicli di guida, bensì dei cicli di carico da far compiere al motore termico per certificare le sue emissioni e consumi. Tra questi si annoverano:

PARTE II

Materiali e Metodi

- 1) ECE R49: Ciclo stazionario per motori di autocarri pesanti. Consiste in una sequenza di 13 modalità di prova al banco dinamometrico del motore. Utilizzato per la certificazione delle emissioni dei motori pesanti fino alla fase Euro II.
- 2) ESC (OICA): Ciclo stazionario per motori di autocarri e autobus. Il test ESC è utilizzato per la certificazione delle emissioni dei motori diesel pesanti a partire dalla fase Euro III (2000).
- 3) ELR: Il test viene utilizzato per la determinazione dell'opacità dei fumi durante la certificazione delle emissioni dei motori diesel per veicoli pesanti a partire dalla fase Euro III (2000).
- 4) ETC (FIGE): Ciclo di prova transitorio per motori di autocarri e autobus. Viene utilizzato, insieme all'ESC, per la certificazione delle emissioni dei motori per veicoli pesanti. Una versione non standardizzata per veicoli, nota come ciclo FIGE, viene talvolta utilizzata per scopi di ricerca.

Anche se non standardizzato, il profilo di velocità ETC (FIGE), è quello di maggior interesse per lo scopo di ricerca. Il ciclo di prova ETC (European Transient Cycle) è stato introdotto, insieme al ciclo ESC (European Stationary Cycle), per la certificazione delle emissioni dei motori diesel pesanti in Europa a partire dal 2000 (Direttiva 1999/96/CE del 13 dicembre 1999). Il ciclo ETC è stato sviluppato dall'ex Istituto FIGE di Aquisgrana, in Germania, sulla base di misurazioni di cicli stradali reali di veicoli pesanti (Rapporto FIGE 104 05 316, gennaio 1994). Il ciclo ETC finale è una versione ridotta e leggermente modificata della proposta originale della FIGE. Le diverse condizioni di guida sono rappresentate da tre parti del ciclo ETC, tra cui la guida urbana, rurale e autostradale. Ognuno di questi tre profili di guida rappresentativi ha una durata di 600 secondi, e la durata dell'intero ciclo è di 1800s. La prima parte rappresenta la guida in città, con una velocità massima di 50 km/h, frequenti partenze, frenate e fasi di arresto. La seconda parte rappresenta la guida in campagna, che inizia con un segmento di accelerazione ripida. La velocità media è di circa 72 km/h. La terza parte rappresenta la guida in autostrada con una velocità media di circa 88 km/h. Considerata la natura dello studio, verrà analizzata la prestazione energetica proponendo solo la parte del ciclo ETC (FIGE) riguardante la guida urbana, riportato in Figura 53.

PARTE II

Materiali e Metodi

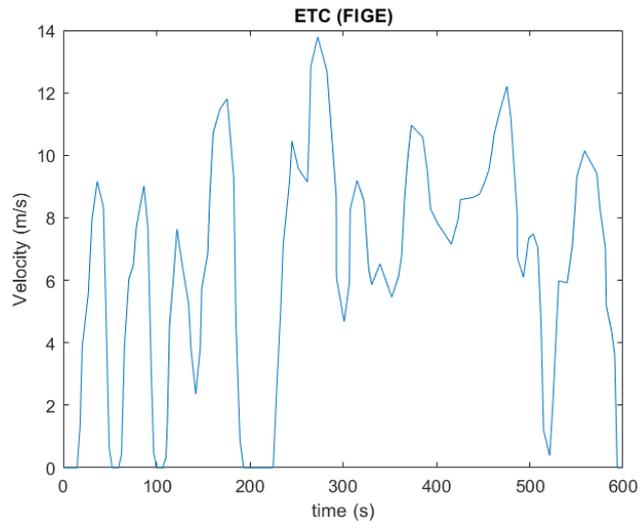


Figura 53: ETC (FIGE) Driving Cycle Urban Phase

Il mercato americano offre invece una grande varietà di profili di guida standardizzati per la valutazione delle prestazioni energetiche dei veicoli pesanti o degli autobus. I più utilizzati in letteratura sono il New York Bus Composite, l'OCTA ed il WMATA .

Il ciclo New York Composite (NYComp) è una prova al banco dinamometrico per veicoli pesanti rappresentativa dei modelli di guida reali nella città di New York. Il test, noto anche come ciclo New York Bus Composite (NYBC), è una versione compressa del "ciclo di prova autobus non filtrato" dell'EPA statunitense. Il profilo di velocità del ciclo NYBC è riportato in Figura 54.

PARTE II

Materiali e Metodi

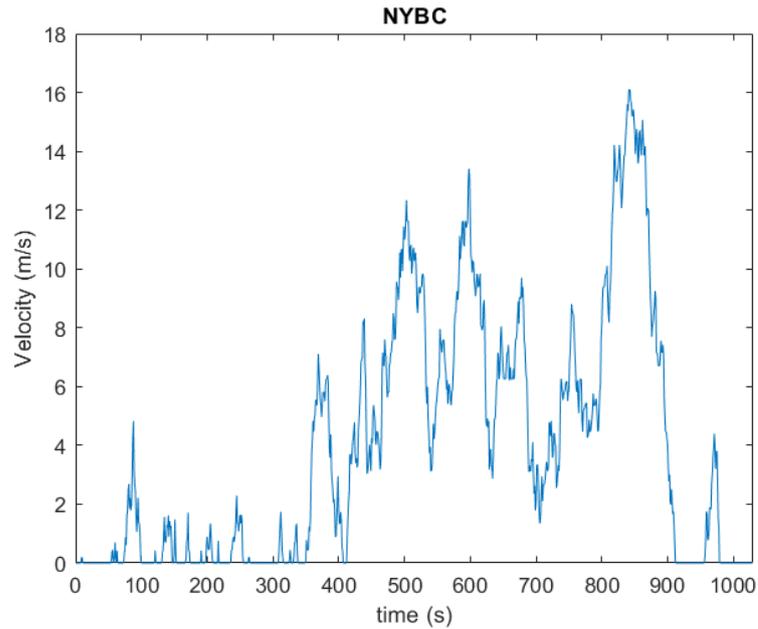


Figura 54: NY BUS Composite Driving Cycle

L'Orange County Bus Cycle (OCTA) è un test al banco dinamometrico per veicoli pesanti. È stato sviluppato dalla West Virginia University (WVU), sulla base dei modelli di guida degli autobus del trasporto urbano nell'area di Los Angeles, in California. Il profilo di velocità del ciclo di guida OCTA è mostrato in Figura 55.

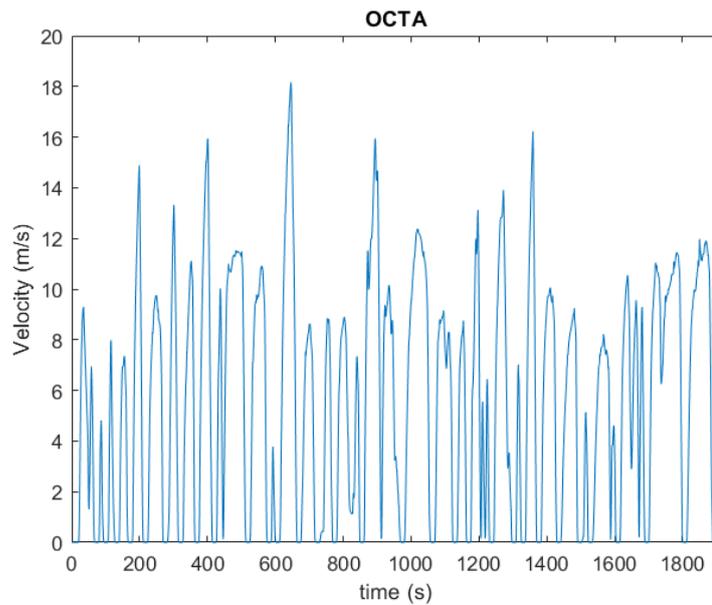


Figura 55: Orange Country Bus Cycle

PARTE II

Materiali e Metodi

Il Washington Metropolitan Area Transit Authority (WMATA) è un ciclo di guida per test al banco dinamometrico, derivato dai dati sulla velocità dagli autobus in transito (durante la percorrenza delle normali tratte) a Washington D.C. e nelle aree circostanti. I dati sulla velocità dei veicoli sono stati registrati con un sistema di GPS per diversi percorsi all'interno del perimetro coperto dai servizi di trasporto pubblico. Questi dati hanno costituito un database dell'attività dei veicoli, che è stato analizzato per caratterizzare il ciclo di lavoro di un tipico autobus in transito nella città di Washington. La Figura 56 mostra il profilo di velocità del ciclo WMATA, mentre la Tabella 31 raccoglie i dati cinetici dei profili di guida appena descritti

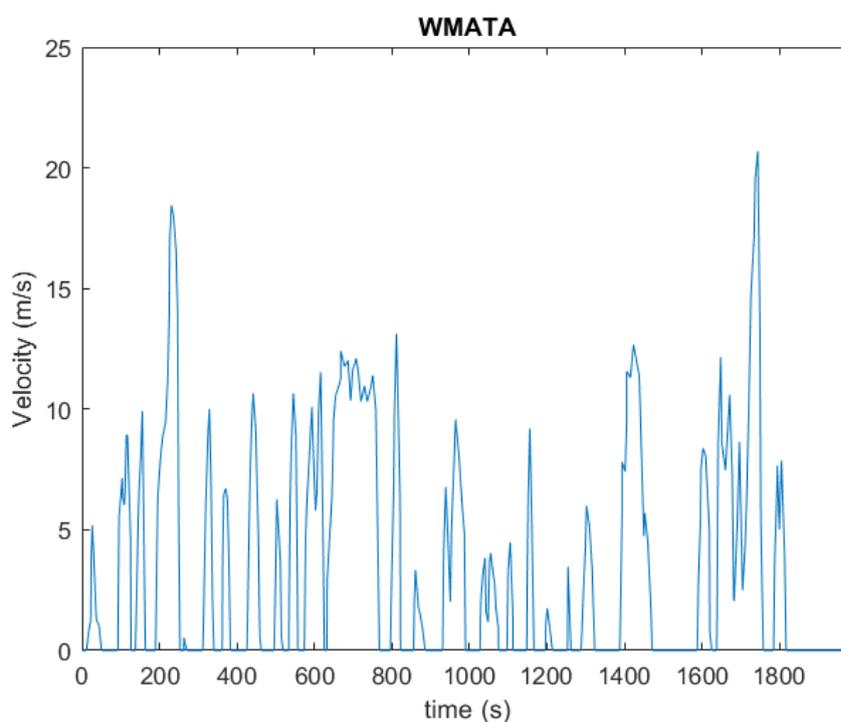


Figura 56: Washington Metropolitan Area Transit Authority (WMATA) Driving Cycle

Tabella 31: Parametri cinetici dei profili di velocità standardizzati

	ETC (FIGE) Urban	NYBC	OCTA	WMATA
Tempo (s)	600	1029	1909	1990
Distanza (km)	3.91	4.06	10.52	6.72
Velocità Max (km/h)	50	57.92	65.38	74.50
Velocità Media (km/h)	23.46	14.25	19.84	12.16
Velocità Media guidata (km/h)	26.55	20.00	25.21	23.95
Numero di stop/km	1	4	3	4

3.2.2. Il Driver e la Strategia di Cambio Marcia

Le azioni del guidatore sui comandi di acceleratore e freno sono state simulate tramite un controllore di inseguimento di velocità longitudinale. In base alle velocità di riferimento (ciclo di guida) e di retroazione (velocità veicolo), il controllore genera comandi normalizzati di acceleratore e freno che possono variare da 0 a 1. La funzione di controllo è di tipo proporzionale-integrale (PI), ossia considera l'errore tra la variabile di riferimento e la variabile di feedback, agendo di conseguenza sulla variabile di controllo con azioni proporzionali all'errore istantaneo (componente proporzionale) e alla variazione temporale dell'errore (componente integrale). In particolare:

- L'azione proporzionale : genera un'azione di controllo proporzionale all'errore tra valore target e valore da controllare, il cui valore dipende dal fattore di guadagno dell'errore. L'azione è istantanea e non permane nel tempo, però può innescare delle oscillazioni della variabile di controllo in rapidi transitori e non garantisce l'annullamento dell'errore a regime.
- L'azione integrale: accumula l'azione di controllo proporzionale all'errore tra valore target e valore della variabile da controllare, genera quindi un'azione di controllo ritardata che permane nel tempo. L'azione integrale ha quindi il compito di far sì che a regime la variabile controllata assuma il valore di set-point, azzerando l'errore a regime introdotto dall'azione proporzionale.

L'azione del controllo PI si traduce matematicamente nell'equazione (3.22)

$$y = \frac{K_{ff}}{v_{nom}} v_{ref} + \frac{K_p e_{ref}}{v_{nom}} + \int \left(\frac{K_i e_{ref}}{v_{nom}} + K_{aw} e_{out} \right) dt + K_G \theta \quad (3.22)$$

in cui e_{ref} è la differenza tra la velocità di riferimento e la velocità del veicolo, mentre e_{out} è la differenza tra la variabile in uscita (y) e la variabile di uscita saturata tra il valore massimo (1) e minimo (-1). Per calcolare i valori da imporre al segnale acceleratore e freno, vengono utilizzate le equazioni (3.23) e (3.24), mentre la Tabella 32 raccoglie i valori dei parametri utilizzati nell'equazione (3.22)

$$y_{acc} = \begin{cases} 0 & y_{sat} < 0 \\ y_{sat} & 0 \leq y_{sat} \leq 1 \\ 1 & 1 < y_{sat} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$y_{acc} = \begin{cases} 0 & y_{sat} > 0 \\ -y_{sat} & -1 \leq y_{sat} \leq 0 \\ 1 & Y_{sat} < -1 \end{cases} \quad (3.24)$$

Tabella 32: Parametri che definiscono l'azione del controllore PI

Parametro	Simbolo	Valore
Velocità veicolo	V_{nom}	- (km/h)
Velocità di riferimento	V_{ref}	- (km/h)
Guadagno proporzionale	K_p	50 (-)
Guadagno integrale	K_i	1 (-)
Guadagno Anti-windup	K_{aw}	0.1 (-)
Guadagno Feed-Forward	K_{ff}	0.1(-)
Guadagno Anti-windup inclinazione stradale	K_g	0.1 (1/rad)
Angolo inclinazione stradale	θ	- (rad)
Variabile di controllo nominale	y	- (-)
Variabile di controllo saturata	y_{sat}	- (-)
Errore velocità	e_{ref}	- (km/h)
Errore variabili di controllo	e_{out}	- (km/h)

Il veicolo oggetto di studio è equipaggiato con un cambio meccanico a sei rapporti gestito da un algoritmo di controllo che definisce quale marcia innestare. Le varie tipologie di controlli per i cambi robotizzati sono già state introdotte nella sezione 1.3.3, che descrive lo scopo e la teoria che sta alla base della progettazione di un controllo per la strategia di cambiata. Per l'algoritmo di controllo del cambio sviluppato in questo studio, due sono gli input che definiscono la strategia di cambio marcia: velocità di rotazione dell'albero primario e posizione pedale acceleratore. Durante la progettazione del sistema di controllo è stato necessario considerare che i fornitori di potenza del veicolo, motore termico e macchina elettrica, sono sottoposti a vincoli rotazionali estremamente differenti. La macchina elettrica riesce a fornire coppia meccanica anche a velocità di rotazione nulle, mentre la velocità di rotazione limite superiore (in termini assoluti) è di circa 3150 rpm. Il motore termico è invece vincolato a lavorare tra due velocità limite diverse dal valore nullo, in particolare i punti operativi ammissibili sono compresi tra la sua velocità minima ($\omega_{ICEidle}$, 800 rpm) e la sua velocità massima (ω_{ICEmax} , 2400 rpm). Vista la configurazione dell'unità di potenza, è necessario che il motore termico e la macchina elettrica ruotino alla stessa velocità di rotazione quando la frizione 1 risulta ingaggiata, a meno di scivolamenti volontari o

PARTE II

Materiali e Metodi

involontari della stessa. Da ciò nasce l'esigenza di imporre gli stessi vincoli rotazioni del motore termico alla macchina elettrica quando lavorano in modo congiunto. Si consideri comunque che la macchina elettrica dimostra l'efficienza più alta nell'intervallo di velocità di rotazione compreso tra i 900 rpm e 2400 rpm; considerando che questo intervallo di velocità di rotazione rientra entro i limiti imposti dal motore termico, e vista il vantaggio energetico che comportano, il sistema di controllo agirà per mantenere la velocità di rotazione dei propulsori entro questi limiti. Solo a basse velocità lineari del veicolo, quando il cambio si trova in prima marcia e la velocità dell'albero primario è inferiore a $\omega_{ICEidle}$, è permesso svincolare il motore termico dalla macchina elettrica tramite il disingaggio della frizione 1 ed ammettere quindi velocità differenti. Non essendo limitata inferiormente a velocità maggiori di zero, la macchina elettrica può essere sempre in presa diretta con il cambio in condizioni di guida, così da permettere le partenze senza l'utilizzo della frizione ed eventualmente la trasmissione della coppia di Creep. Solo quando viene comandata la condizione di posizione del cambio in neutro, ossia albero primario e secondario non vincolati meccanicamente, la macchina elettrica non sarà in grado di scambiare coppia con le ruote, così come quando viene comandato il disingaggio della frizione 2. La condizione di neutro può essere imposta o dal guidatore, tramite comando, o essere conseguenza dell'azione di altri controlli (ricarica stazionaria o park), o durante il cambio marcia. Nel passaggio tra una marcia e l'altra l'albero primario e ed il secondario sono meccanicamente svincolati, per il tempo necessario per permettere agli attuatori meccanici di passare dalla marcia corrente a quella target. Per evitare numerosi cambi marcia, inoltre, ogni marcia rimarrà innestata per un tempo non inferiore ad un tempo minimo, comunque calibrabile. Indicando con i la marcia innestata, il controllo comanderà l'innesto della marcia $i+1$ quando la velocità dell'albero primario sarà superiore a $\omega_{up(i \rightarrow i+1)}$, definita nell'equazione (3.25).

$$\omega_{up(i \rightarrow i+1)} = K_{up(i \rightarrow i+1)} + K_{acc} \cdot Acc \text{ con } 1 \leq i \leq 5 \quad (3.25)$$

Dall'equazione (2.29) si nota che la velocità di rotazione limite per ogni marcia dipende dalla somma di due contributi: il primo è una costante di calibrazione, $K_{up(i \rightarrow i+1)}$, definita in base al rapporto di trasmissione della i -esima marcia, il secondo termine è pari al prodotto del pedale acceleratore per un'ulteriore variabile di controllo, K_{acc} . Un alto valore del pedale fa intendere che il guidatore voglia aumentare la velocità del veicolo in maniera proporzionale al valore dello stesso. Far aumentare il valore di ω_{up} ritarderà il cambio marcia permettendo un'accelerazione più fluida e la disponibilità di una maggiore coppia quando il motore termico è attivo. Il

PARTE II

Materiali e Metodi

passaggio da dalla marcia i alla marcia $i-1$ avviene quando la velocità di rotazione dell'albero primario è inferiore a $\omega_{\text{dwn}(i \rightarrow i-1)}$, espressa nell'equazione (3.26)

$$\omega_{\text{dwn}(i \rightarrow i-1)} = K_{\text{dwn}(i \rightarrow i-1)} + K_{\text{acc}} \cdot \text{Acc con } 2 \leq i \leq 6 \quad (3.26)$$

Anche in questo caso la velocità di rotazione limite inferiore per ogni marcia dipende dalla somma di una costante di calibrazione, definita in base al rapporto di trasmissione della i -esima marcia, e da una velocità di rotazione variabile proporzionale valore del pedale acceleratore. Se l'albero primario ruota con velocità prossima alla velocità limite inferiore per l' i -esima marcia, ed il guidatore preme sul pedale acceleratore, la componente aggiuntiva aumenterà il limite inferiore, portando presumibilmente il controllo del cambio ad imporre la marcia $i-1$. Viste le mappe motore ed il rapporto di ogni marcia, attraverso il downshift il guidatore sperimenterà una maggiore forza di trazione che gli permetterà di raggiungere accelerazioni più elevate. In Tabella 33 sono riportati i valori di K_{up} e K_{dwn} per ogni transizione, così come il valore di K_{accup} e K_{accdwn} .

Tabella 33: Parametri per la gestione delle strategia di cambiata

K upshift (rpm)		K downshift (rpm)	
1→2	2150	2→1	850
2→3	2100	3→2	950
3→4	2250	4→3	950
4→5	2100	5→4	950
5→6	1900	6→5	1050
K_{accup}	50	K_{accdwn}	50

3.2.3. Consumo di Combustibile Equivalente

Con l'avvento della propulsione ibrida ed elettrica è nata l'esigenza di confrontare l'efficienza energetica delle nuove tecnologie con quella delle tecnologie tradizionali. Nel maggio 2011, la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) e la United States Environmental Protection Energy (EPA) hanno emesso una norma finale congiunta che stabilisce una misura di equivalenza dell'efficienza dei veicoli con trazione elettrica con quelli di vecchia generazione. Il confronto si basa sulla definizione delle miglia per gallone equivalenti, partendo dal calcolo del quantitativo di galloni di benzina necessari per produrre un'unità di energia elettrica espressa in kWh. Basandosi sul contenuto energetico della benzina, le agenzie hanno calcolato che il contenuto energetico di un gallone USA di benzina può essere utilizzato per produrre 33.7 kWh elettrici, considerando la trasformazione con efficienza unitaria.

PARTE II

Materiali e Metodi

Partendo da questa assunzione, tramite l'equazione (3.27), è possibile equiparare la potenza elettrica della batteria con il consumo (espresso in chilogrammi) di combustibile.

$$m_{efuel} = \int \frac{Pwr_{Batt} \cdot K_{gal} \cdot \rho_{Diesel} \frac{kg}{m^3}}{1000 \cdot 3600 \cdot 33.7} \quad (3.27)$$

In cui Pwr_{Batt} (Watt) è la potenza istantanea della batteria, $K_{gal/mc}$ è il fattore di conversione tra galloni americani e metri cubi e ρ_{Diesel} è la densità del combustibile che alimenta il motore (espressa in kg/m^3). Si noti che quando la potenza della batteria è positiva (scarica) il valore di combustibile equivalente aumenta, mentre diminuisce quando la potenza della batteria è negativa (ricarica). Il quantitativo di combustibile considerato per la valutazione dell'efficienza energetica (m_{ref} , equazione 3.28) è dato dalla somma del combustibile consumato dal motore termico, integrando i valori in uscita dalla mappa in Figura 34, ed il consumo elettrico equivalente presentato nell'equazione (3.28). Nota la massa di combustibile equivalente, l'equazione (3.29) descrive l'efficienza energetica in termini di chilometri percorsi con un litro equivalente di combustibile.

$$m_{ref} = m_{ICE} + m_{efuel} \quad (3.28)$$

$$Avg_{cons} = \frac{m_{ref}}{d \cdot \rho^*_{Diesel} \frac{kg}{l}} \quad (3.29)$$

Nell'equazione (3.29), d è la distanza percorsa dal veicolo (km) e ρ^* è la densità del Diesel espressa in kg/l .

3.2.4. Ottimizzazione dei Parametri di Controllo

Definita la funzione che simula gli input provenienti dal driver, la strategia di cambiata e validate le equazioni che definiranno le funzioni obiettivo, è possibile procedere con la fase di ottimizzazione.

L'ottimizzazione è stata svolta in ambiente Matlab/Simulink, utilizzando il metodo di ottimizzazione "Pattern Search" con base massima (2N). Lo scopo dell'ottimizzatore è ricercare quale set dei parametri SOC_{trgt} , $Chrg_{fctr}$, Act_{pwr} e η_{chrg} definisca il miglior compromesso tra

PARTE II

Materiali e Metodi

massimizzazione dell'efficienza energetica in termini di consumo medio equivalente e minimizzazione dei fenomeni di degrado della batteria, quindi massimizzazione della capacità della batteria al termine di ogni missione (percorrenza di un ciclo di guida). La ricerca dei parametri ottimi è avvenuta per ogni ciclo di guida standardizzato descritto nella sezione 3.2.1. Per avere un parametro di confronto, è stato adattato il modello dinamico del veicolo per valutare le prestazioni energetiche in termini di autonomia considerando che la trazione sia affidata solo al motore termico. In particolare, la massa del veicolo è stata decurtata della componentistica elettrica (massa motore ed inverter, massa pacco batteria e massa cablaggio ad alta tensione), così come non sono state considerate le perdite inerziali dovute alla presenza della macchina elettrica tra albero primario e frizione 1. Il driver e la strategia di cambiata sono rimaste invariate, essendo il primo indipendente dal tipo di motorizzazione e la seconda già calibrata per considerare i vincoli del motore termico. La coppia massima disponibile in questo caso non fa più riferimento alla curva di coppia massima della macchina elettrica ma a quella del motore termico. La Tabella 34 mostra il consumo medio del veicolo con motorizzazione termica nella percorrenza dei profili di velocità standardizzati presentati precedentemente.

Tabella 34: consumi veicolo di riferimento con mototrazione tradizionale (solo motore termico)

Trazione puramente termica						
	Dist. (km)	durata (s)	Vel. media (m/s)	Vel. massima (m/s)	tempo idle %	consumo km/l
SORT1	0.52	154	3.37	11.10	38.194	1.75
WMATA	6.72	1990	3.38	20.69	48.729	1.91
NYB	4.04	1029	3.92	16.09	31.195	1.99
SORT2	0.92	183	4.96	13.88	32.577	2.14
OCTA	10.55	1909	5.53	18.16	19.649	2.19
SORT3	1.45	206	6.90	16.67	22.895	2.49
FIGE	3.91	600	6.52	13.89	11.500	3.08

Dalla Tabella 34 si può notare che i cicli che hanno mostrato il peggior rendimento in termini di economia di combustibile sono quelli in cui il valore del rapporto tra tempo in *standstill* e durata totale del ciclo è più alto. Nelle ipotesi delle simulazioni, l'unità di potenza non è dotata di un sistema Start&Stop, il motore termico continua quindi a consumare combustibile anche nelle fasi *standstill*. L'autobus, per sua natura, è soggetto a numerose fasi di stop e conseguenti ripartenze, da questa prima analisi si evince come l'implementazione di un sistema S&S possa dare un grande contributo all'abbattimento dei consumi.

PARTE II

Materiali e Metodi

Ottenuti i valori di benchmark, è stata avviata la procedura di ottimizzazione che, per ogni ciclo di guida, prevede l'esecuzione di tre passaggi:

- 1) Definizione dei parametri da ottimizzare e dei range ammissibili;
- 2) Definizione della funzione obiettivo;
- 3) Definizione setting di ottimizzazione.

I parametri di calibrazione da ottimizzare sono stati già definiti nell'analisi dei requisiti software ma non sono stati invece definiti i range operativi ammissibili. Nei confronti dei valori ammissibili dal SOC_{trgt} è stato considerato che, come descritto in [109], i fenomeni di degrado sono massimi quando lo stato di carica della batteria si trova nei suoi valori estremi (0 -20% e 80-100%), quindi il range ammissibile esclude a prescindere questi valori. Per permettere al veicolo di percorrere una distanza adeguata in modalità Charge Depleting, si è ammesso un utilizzo che coinvolga circa il 50% della disponibilità energetica della batteria, quindi $SOC=50\%$. Da queste assunzioni, i valori ammissibili per SOC_{trgt} durante le fasi di ottimizzazione sono compresi entro il range di 40% e 55%. Il valore di η_{chrg} quantifica la disponibilità dell'energia cinetica del veicolo nella previsione di ricarica tramite frenata rigenerativa. Anche in questo caso si è valutato il range ammissibile che è stato definito compreso tra 0.2 (l'energia cinetica influisce in maniera marginale sul SOC_{opt}) e 1 (tutta l'energia cinetica viene considerata nel calcolo di SOC_{opt}). I valori $Chrg_{fctr}$ e Act_{pwr} sono mutuamente correlati, in quanto definiscono nell'insieme le condizioni di attivazione o disattivazione della modalità Charge Sustaining. Il loro range di variazione è compreso tra il 50% ed il 150% dei valori di tentativo definiti nella sezione 3.1. Nel caso del $Chrg_{fctr}$, essendo questo un valore definito da una mappa, il range di variazione è riferito ad ogni valore della mappa stessa. In pratica la mappa è stata moltiplicata per un coefficiente correttivo che può assumere valori compresi tra 0.5 e 1.5. In Tabella 35 è riportato il range ammissibile dal fattore di correzione, mentre in Figura 57 è riportata la variazione della curva di $Chrg_{fctr}$ in funzione del parametro correttivo utilizzato durante le simulazioni di ottimizzazione. La Tabella 35 raccoglie il range di variazione dei parametri e il loro passo di variazione.

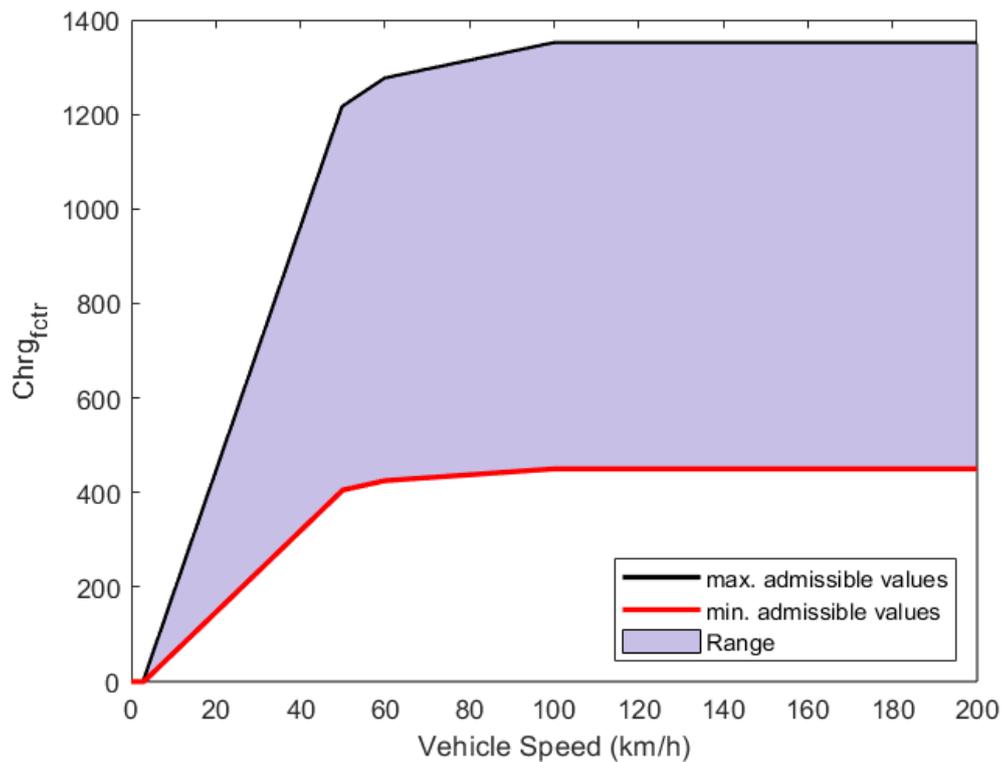


Figura 57: Range di valori ammessi per il $Chrg_{fctr}$ durante le fasi di ottimizzazione

Tabella 35: Parametri da ottimizzare e loro range ammissibile

	Valore minimo	Valore massimo	Passo di variazione
SOC_{trgt} (%)	40.00	55.00	0.01
η_{chrg} (-)	0.20	0.80	0.01
Chrg_{fctr} gain (-)	0.50	1.50	0.01
Act_{Pwr} (kW)	139	417	0.01

L'obiettivo della procedura di ottimizzazione è quello di massimizzare sia l'autonomia del veicolo, espressa in chilometri percorsi con un litro di combustibile equivalente, sia la capacità della batteria. Sia l'autonomia che la variazione di capacità della batteria sono influenzate dalla modalità di funzionamento. In modalità Charge Depleting la batteria è soggetta solo ai carichi elettrici direttamente conseguenti dalla forza di trazione richiesta dal driver, così come il consumo di combustibile è solo quello equivalente. In modalità Charge Sustaining anche il motore termico può concorrere alla trazione o alla ricarica della batteria; quindi, i carichi elettrici sono dipendenti dalle condizioni operative del veicolo. Il consumo di combustibile sarà la somma di m_{ICE} e di m_{Fuel} . Per permettere al veicolo di sperimentare entrambe le modalità di funzionamento, tutti i cicli sono stati ripetuti un numero di volte sufficiente per raggiungere una

PARTE II

Materiali e Metodi

distanza minima di 30km. Tramite l'equazione (1.60) e (3.29) è possibile valutare la capacità rimanente della cella, e quindi del pacco batteria, così come l'efficienza energetica del veicolo in termini di distanza percorsa con un litro di combustibile equivalente. Quindi la funzione obiettivo è espressa tramite l'equazione (3.30)

$$objfunc = maximize(Qc, Avg_{cons}) \quad (3.30)$$

In generale, i solutori di Optimization Toolbox™ offerti dal pacchetto Matlab/Simulink iterano per un massimo di k interazioni alla ricerca di un ottimo che soddisfi i requisiti dell'ottimizzatore.

È già stato descritto come, durante la fase di polling, il solutore può variare la dimensione dello scalare Δ^k moltiplicandolo per un fattore di concentrazione o di espansione, che per il solutore viene definita come un'operazione intermedia.

Le valutazioni intermedie vengono chiamate F-count e dipendono dallo spazio vettoriale utilizzato per l'ottimizzazione. Il numero delle F-count è indice dei tentativi effettuati dal solutore durante la ricerca dei parametri ottimi che soddisfano i vincoli, comprendendo sia i tentativi andati a buon fine sia quelli che non hanno rispettato i requisiti (vincoli o convergenza). Nell'analisi dei risultati è quindi utile visualizzare non solo le interazioni svolte dal solutore (k), ma anche il numero di F-Count totali.

Definite le variabili da ottimizzare in relazione alle funzioni obiettivo, è stato richiesto al software la ricerca dei valori ottimi entro un massimo di cento interazioni. La Tabella 36 raccoglie le informazioni circa il numero di ripetizioni di ogni ciclo di guida e quindi la distanza simulata, il set di parametri risultato dell'ottimizzazione rispetto al singolo ciclo di guida ed il numero di F-count durante il processo di ottimizzazione. La Tabella 36 riporta anche il valore di consumo medio e di capacità residua della cella, ossia quella della batteria normalizzata rispetto al numero di paralleli, ottenuti utilizzando i parametri ottimi. La Figura 58 mostra il modello dinamico, sviluppato in ambiente Matlab\Simulink, utilizzato per la valutazione delle prestazioni del veicolo.

PARTE II

Materiali e Metodi

- 2) I cicli di guida con una velocità media inferiore sono quelli che danneggiano meno la cella. Una velocità media inferiore indica anche una potenza richiesta media inferiore. Questo si traduce in minor carico elettrico medio alla batteria e correnti di carica e scarica più basse. Al crescere della velocità media crescerà anche il carico richiesto dal driver; tutti i fornitori di potenza saranno obbligati a lavorare in condizioni più critiche.
- 3) Non emerge una chiara correlazione tra caratteristiche cinetiche del profilo di velocità e set di parametri che ottimizzano la gestione energetica del veicolo. Dalla Tabella 36 si nota come il set che ottimizza la gestione energetica dell'unità di potenza durante l'esecuzione del ciclo SORT1 e del ciclo FIGE dimostrino lo stesso SOC_{trgt} (46%) e lo stesso valore di Act_{pwr} (220 kW), nonostante i due profili dimostrino tempi di idle e velocità media estremamente differenti (3.37 m/s per il SORT1, 6.52 m/s per il FIGE), così come il valore del numero di stop al chilometro. Anche il valore di η_{chrg} non è direttamente proporzionale alla velocità massima o a quella media del ciclo, nonostante influenzi un termine dipendente dal quadrato della velocità.

Dalle considerazioni di cui sopra risulta chiaro che le prestazioni del veicolo sono dipendenti dalle caratteristiche cinetiche del ciclo di guida, ma anche che non è immediato definire una correlazione tra queste caratteristiche e i parametri che ne ottimizzano il funzionamento da un punto di vista energetico. Il passo successivo è stato quindi quello di definire un set di variabili che offrano il miglior compromesso in termini energetici per tutti i cicli di guida analizzati, non solo per il singolo ciclo di guida. Si potrebbe ottenere il set tramite media pesata dei parametri presenti in Tabella 36 ma, non essendo chiara la correlazione tra parametri e ciclo di guida, il rischio potrebbe essere quello di scegliere un fattore di peso errato. Il nuovo set di parametri comunque non definirà l'ottimo per nessun ciclo specifico, ma ottimo sulla percorrenza globale degli stessi; ci si aspetta una diminuzione delle performance energetiche nell'esecuzione della singola tratta.

La Tabella 37 riporta il valore assunto da SOC_{trgt} , Act_{pwr} , η_{chrg} e $Chrg_{fctr}$ gain risultato di un'ottimizzazione globale. In Tabella 37 sono stati confrontati anche i risultati delle simulazioni riguardanti la percorrenza dei singoli cicli di guida con i parametri di ottimo locale e con i parametri di ottimo globale.

PARTE II

Materiali e Metodi

Tabella 37: confronto risultati simulazioni utilizzando i parametri di ottimo locale e di ottimo globale

Global Optimization Variables Value						
		SOC _{trgt}	Chrg _{fctr} gain	Act _{pwr}	η _{chrg}	
		45 (%)	0.92 (-)	182.5 (kW)	0.72 (-)	
Avg. Fuel cons (km/l)			Cell Residual Capacity (Ah)			
	Local var.	Global var.	Perc. Err (%)	Local var.	Global var.	Perc. Error (%)
SORT1	7.12	6.93	-2.70	2.499986519	2.499985942	-2.30E-05
SORT2	6.81	6.45	-5.36	2.499972964	2.499972835	-5.15E-06
SORT3	6.59	6.45	-2.09	2.499957325	2.499953089	-1.69E-04
OCTA	6.22	6.12	-1.67	2.499966537	2.499962822	-1.48E-04
NYBC	7.29	6.84	-6.12	2.499960274	2.499957810	-9.85E-05
WMATA	6.39	6.35	-0.63	2.499972344	2.499970628	-6.86E-05
FIGE	9.17	8.90	-2.93	2.499988310	2.499986617	-6.77E-05

Dai valori riportati in Tabella 37 risulta un evidente svantaggio nell'utilizzo dei parametri di ottimo globale nell'esecuzione delle singole tratte rispetto all'utilizzo dei parametri che ottimizzano la gestione energetica della singola tratta, cioè quelli definiti locali. Per quanto riguarda il consumo di combustibile equivalente medio, si ha un aumento dello 0.63% nel migliore dei casi (WMATA), fino ad un aumento di oltre il 6% nel peggiore dei casi (NYBC). La differenza tra capacità finale della cella utilizzando i parametri globali piuttosto che quelli locali può sembrare irrisoria, ma bisogna considerare la variazione del degrado di Qc in relazione alla distanza percorsa. La Tabella 38 raccoglie i dati riguardanti i chilometri totali percorribili fino al raggiungimento della capacità di End of Life per la cella considerando la percorrenza ripetuta dei singoli cicli di guida, utilizzando i parametri di ottimo locale e quelli di ottimo globale.

Tabella 38: confronto tra stima dei chilometri percorribili fino al raggiungimento della capacità QEOL

Ciclo	Km con Local var.	Km con Global var.	Err. Perc (%)
SORT1	1118611	1072694	-4.10
SORT2	561469	558807	-0.47
SORT3	356766	324548	-9.03
OCTA	471565	424444	-9.99
NYBC	408800	384927	-5.83
WMATA	607463	571980	-5.84
FIGE	1337919	1168646.	-12.65

I dati contenuti in Tabella 38, anche se non considerano diversi fattori che possono ridurre sostanzialmente il numero di chilometri percorribili fino al raggiungimento della QEOL (i.e. effetto del carico degli ausiliari, pendenze stradali e carico passeggeri), danno un'indicazione importante circa l'effetto delle piccole perdite di capacità riportate in Tabella 37. La differenza

PARTE II

Materiali e Metodi

percentuale irrisoria, riscontrata al termine dello svolgimento delle tratte utilizzando set di parametri differenti, diventa estremamente apprezzabile se confrontata con la distanza chilometrica sacrificata a causa dell'utilizzo delle variabili di ottimo globale piuttosto che locale. Minor distanza percorribile significa dismettere il pacco batterie in un tempo inferiore, che comporta costi economici ed ambientali dovuti allo smaltimento e manutenzione del veicolo superiori.

Nonostante quanto appena discusso, però, in assenza di dati riguardanti l'effettivo utilizzo del veicolo, la scelta dei parametri ottimi risulta essere la più adeguata, essendo il miglior compromesso tra le condizioni di guida che possono richieste al veicolo.

Definito il set di parametri per il sistema di controllo, lo sviluppo può proseguire con la generazione del codice da implementare sull'hardware (coding), e con i test Model in the Loop, Software in the Loop e Hardware in the Loop.

3.3. Coding

Al giorno d'oggi, la programmazione viene eseguita associando ad ogni variabile una configurazione chiamata "tipo", che permette di determinare la dimensione della memoria che le variabile può occupare (intervallo di valori) e come deve essere interpretato il valore della variabile (con/senza segno o punto decimale, testo ASCII, data). Tra le varie configurazioni, le più utilizzate sono "tipi di dati semplici", noti anche come "tipi di dati di base". La Tabella 39 contiene i tipi di dati di base disponibili in conformità alla norma IEC 61131-3, che ne mostra l'identificativo, la memoria occupata (in bit) ed i possibili valori numerici che la variabile può assumere.

Tabella 39: Data types

Type	Size	Range
BOOL	1	0...1
USINT	8	0...255
SINT	8	-128...127
UINT	16	0...65535
INT	16	-32768...32767
UDINT	32	0...4294967295
DINT	32	-2147483648...2147483647
REAL	32	-3.4e38...3.4e38
LREAL	64	-1.7976e308...1.7976e308

PARTE II

Materiali e Metodi

Nello sviluppo della matematica di controllo è stato associato ad ogni segnale (sia questo in ingresso, in uscita od interno al sistema di controllo) un “tipo”. Il tipo assegnato dipende dalla precisione numerica richiesta, dallo scopo del segnale (se è un segnale di comando o di informazione) e dalle elaborazioni matematiche a cui è soggetto il segnale stesso. La definizione del “tipo” per ogni variabile è un passaggio cruciale nella modellazione, in quanto un’assegnazione errata potrebbe comportare una codifica dei segnali incoerente, con conseguenti malfunzionamenti del software. Assegnato il tipo ad ogni variabile, è stato possibile procedere alla scrittura del codice, in linguaggio C, della matematica di controllo discussa nei paragrafi precedenti. Seguendo i passaggi definiti dalla progettazione secondo Model-Based Design, la scrittura del codice è stata affidata ad un compilatore automatico in grado di interpretare le relazioni logiche e matematiche del modello a blocchi sviluppato in Matlab\Simulink e generare il codice corrispondente. In commercio esistono diversi tipi di compilatori automatici in grado di generare i codici di diversa natura a partire da uno schema a blocchi tipico di una modellazione ad oggetti. In questo studio ci si è affidati al tool “Embedded Coder”, in quanto disponibile come espansione delle funzionalità di Simulink e quindi estremamente compatibile. Il tool è stato configurato con i parametri presenti in Tabella 40.

Tabella 40: Parametri di configurazione del Tool Embedded Coder

Valori di setting di Embedded Coder	
Programming language	C
Description	Embedded Coder
Toolchain	MinGW64 gmake (64-bit Windows)
Build Configuration	Faster Builds
Device Vendor	Infineon
Device Type	TriCore
Objective Specified	RAM efficiency, Execution efficiency, ROM efficiency

Avvenuta la generazione del codice, Embedded Coder restituirà come risultato il codice che descrive le funzioni del sistema di controllo nel linguaggio di programmazione definito (in questo caso C) ed i file di *header* associati al progetto.

3.4. Test Model in the Loop

La procedura di test Model in the Loop è necessaria per verificare che la matematica che definisce il sistema di controllo rispetti i requisiti elaborati nelle fasi iniziali di sviluppo. Questa fase di test non coinvolge il vero e proprio codice di controllo, ma le equazioni che definiscono le transizioni tra uno stato di funzionamento ed un altro (i.e. da Charge Depleting a Charge

PARTE II

Materiali e Metodi

Sustaining) e che i valori di coppia richiesti ai motori siano plausibili e congruenti. La procedura di test è stata svolta in ambiente totalmente simulativo offline in cui il modello matematico che descrive il veicolo e quello che descrive il controllo sono eseguiti su un singolo nodo di calcolo (ambiente Matlab/Simulink). La Figura 59 mostra lo schema dell'ambiente simulativo in cui sono state svolte le simulazioni.

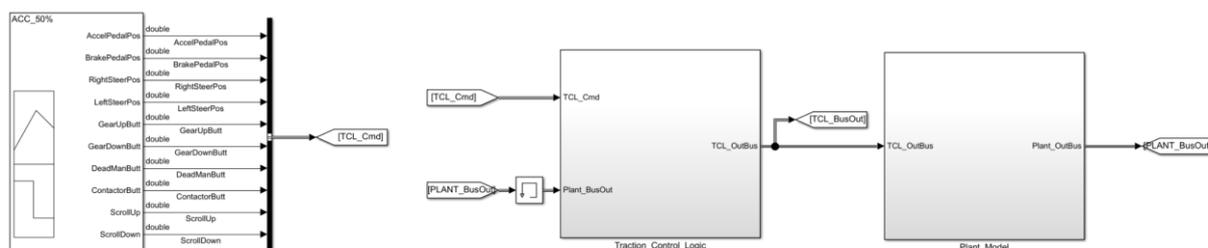


Figura 59: Layout test Model in The Loop

La Figura 59 chiarisce l'interazione tra sistema di controllo e modello del veicolo. L'Energy Management System riceve gli input dal blocco "Signal Generator" (simula i segnali provenienti dal guidatore), oltre che i segnali di feedback provenienti dal modello del veicolo, li elabora e produce dei segnali di comando per i fornitori di potenza. I segnali di comando causeranno una risposta del veicolo e, conseguentemente, una variazione dei valori dei segnali di feedback, che verranno nuovamente elaborati dal sistema di controllo ripetendo il loop. Per verificare che il veicolo rispetti i requisiti, tramite il blocco Signal Generator sono stati inviati al EMS dei segnali di carico appositi per valutare il comportamento del veicolo in condizioni di Creep, Compression, frenata rigenerativa, Charge Depleting, Charge Sustaining, e Stationary Charge.

In Figura 60 è possibile apprezzare le varie modalità di funzionamento del veicolo. Lo stato di carica della batteria è prossimo ai suoi valori massimi e, durante la prova, non risulta mai inferiore al valore di SOC=85%. In queste condizioni il sistema di controllo comanda la modalità Charge Depleting e la macchina elettrica è l'unico fornitore di potenza per la trazione. In Figura 60 sono evidenziate tre particolari zone di funzionamento:

- 1) In verde è evidenziato l'intervallo di simulazione in cui il controllo richiede la coppia di Compression. In questa zona il segnale di carico proveniente dall'acceleratore è nullo così come la richiesta del freno, lo stato di carica della batteria è inoltre di poco inferiore al 90 % e la velocità del veicolo è superiore a 70 km/h. In queste condizioni la coppia di Compression non è limitata; alla macchina elettrica viene richiesta una coppia negativa

PARTE II

Materiali e Metodi

direttamente proporzionale alla velocità di rotazione dell'albero primario. La coppia di Compression causa la ricarica della batteria, seppur lieve.

- 2) In giallo è evidenziato l'intervallo di simulazione in cui il controllo richiede coppia frenante rigenerativa. Il segnale di carico proveniente dall'acceleratore è nullo mentre è massima la richiesta frenante. La velocità del veicolo diminuisce con un rate estremamente più alto rispetto alla zone in cui è presente solo la coppia di Compression, ed anche la coppia negativa richiesta alla macchina elettrica è estremamente superiore rispetto alla zona precedentemente analizzata. In figura è possibile apprezzare anche il comando di coppia nulla durante le fasi di cambio marcia.
- 3) In rosso è evidenziato l'intervallo di simulazione in cui il controllo richiede la coppia di Creep. Il segnale di carico dell'acceleratore e del freno sono nulli, non è inserito il comando di Park o Neutro e la velocità è inferiore a 5 km/h. In queste condizioni alla macchina elettrica viene richiesto di accelerare il veicolo senza comunque superare la velocità di 5 km/h. La coppia richiesta alla macchina elettrica è massima nelle fasi di partenza, e decresce all'aumentare della velocità. L'equilibrio tra coppia motrice e coppia resistente si instaura ad una velocità del veicolo prossima a 4 km/h, ampiamente entro i limiti imposti dai requisiti.

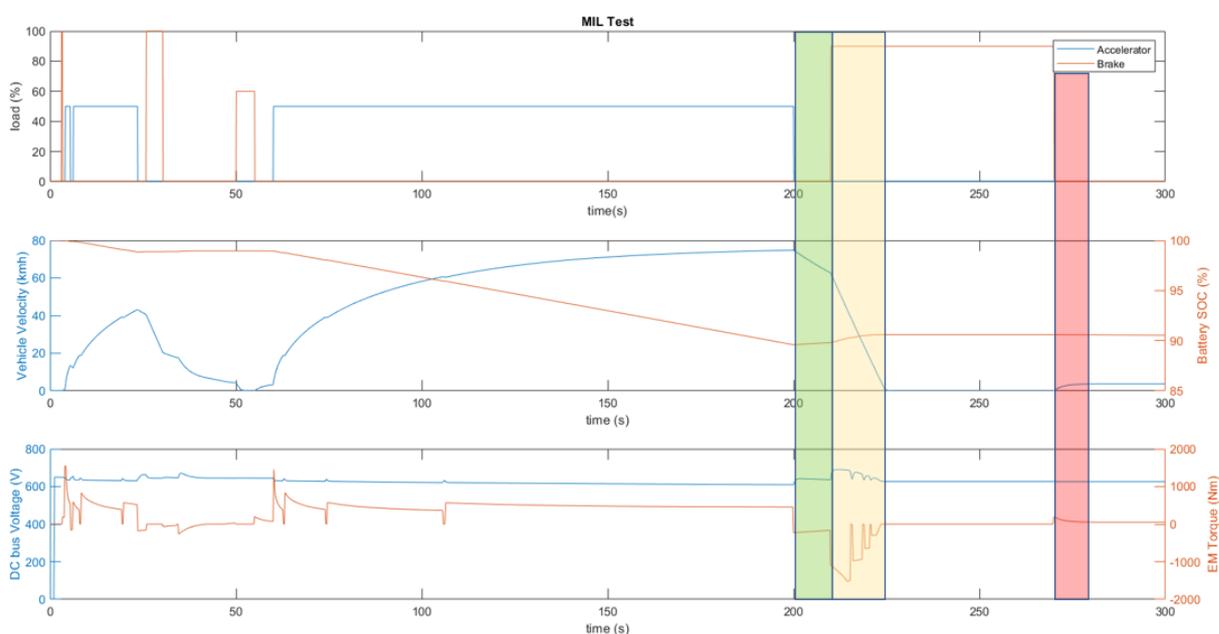


Figura 60: Funzionamento in Charge Depleting, coppia di Compression (verde), coppia di Creep (rosso) e frenata rigenerativa (giallo).

PARTE II

Materiali e Metodi

In Figura 61 è riportata l'evoluzione della velocità del veicolo, dello stato di carica della batteria e delle coppie erogate dai fornitori di potenza durante una prova condotta in condizioni tali da causare l'attivazione della modalità Charge Sustaining. Durante quasi tutta la prova, il segnale di carico dell'acceleratore è stato posto pari a 55%, mentre il segnale che indica la posizione del freno assume il valore nullo. Dopo una fase di transitorio, la velocità del veicolo raggiunge il valore costante di 78 km/h, che è la velocità in cui viene raggiunto l'equilibrio tra forza di trazione e forze resistenti. A regime sarà costante anche la coppia di trazione richiesta dal controllo, infatti:

- Quando è attiva la modalità Charge Depleting l'unico fornitore di coppia è la macchina elettrica, che eroga coppia positiva scaricando la batteria fino a quando non viene richiesta l'attivazione della modalità Charge Sustaining.
- Quando è attiva la modalità Charge Sustaining, il motore termico genera coppia positiva che, nelle condizioni in esame, risulta superiore alla richiesta di coppia necessaria alla trazione. Il surplus di coppia viene assorbito dalla macchina elettrica che lo utilizzerà per ricaricare le batterie. Dalla figura si nota che la velocità del veicolo rimane costante, a regime, in entrambe le modalità di funzionamento, si conclude quindi che la coppia di trazione rimane anche essa costante. Lo stato di carica della batteria oscilla nell'intorno del SOC_{trgt} , tra valori compresi tra $\pm 15\%$ SOC_{trgt} .

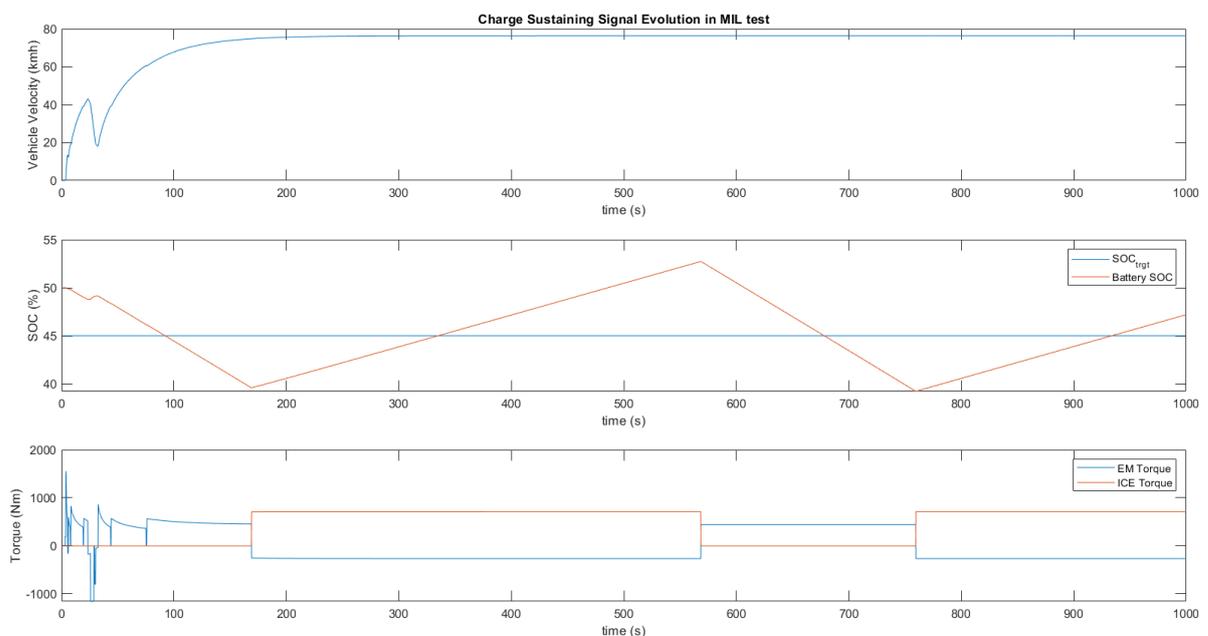


Figura 61: Funzionamento in Charge Sustaining

PARTE II

Materiali e Metodi

La Figura 62 mostra l'evoluzione dello stato di carica della batteria, della velocità veicolo e della coppia erogata dai fornitori di potenza durante l'attivazione della modalità "ricarica stazionaria". La figura mostra l'inserimento del comando Park (DNR = 4) e la successiva richiesta di attivazione della modalità di ricarica stazionaria (SCcmd = 1). Attivata la modalità di ricarica stazionaria, il controllo comanda la coppia di ricarica al motore termico e la coppia di rigenerazione alla macchina elettrica. Dalla Figura 62 si nota che le coppie comandate ai due fornitori di potenza sono uguali in modulo, ma di verso opposto e diverse da zero fino al raggiungimento del SOC_{trgt} . Il veicolo non manifesta comunque alcun tipo di accelerazione, in quanto i moduli di potenza sono scollegati dalla trasmissione, come da requisito.

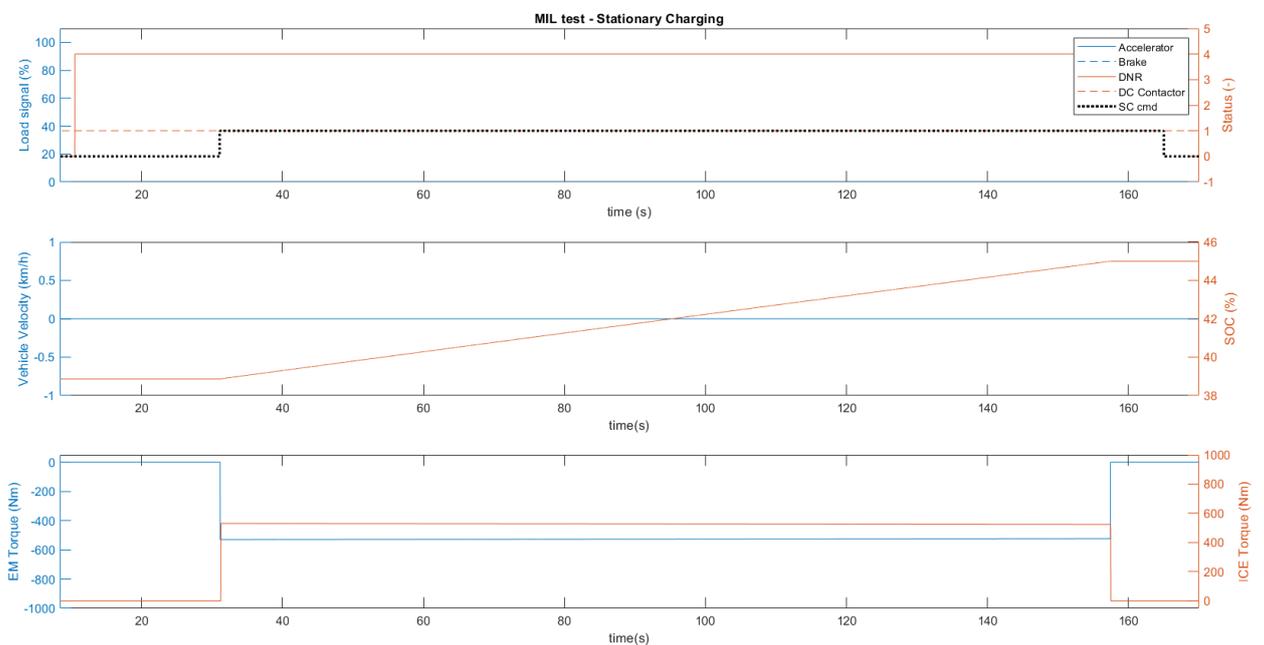


Figura 62: test ricarica stazionaria

Dai risultati dei test mostrati emerge che la matematica che descrive il modello di controllo sia in grado di gestire la propulsione nel rispetto dei requisiti. Verificata la modellazione del EMS tramite il test MIL, è necessario testare l'assegnazione dei "tipi" alle variabili ed il codice generato.

3.5. Test Software in the Loop.

La procedura di test in Software in the loop serve a verificare, ed eventualmente quantificare, la differenza di comportamento del modello matematico che descrive il sistema di controllo ed il relativo codice generato. Questa fase di test è fondamentale per assicurarsi che l'assegnazione

PARTE II

Materiali e Metodi

dei tipi alle variabili, così come la traduzione del modello matematico in codice C, non abbia comportato una modifica nell'interpretazione dei segnali di input o nell'elaborazione dei segnali interni e di output. In questo caso il modello del veicolo ed il sistema di controllo sono eseguiti su due nodi di calcolo differenti. Il modello del veicolo continua ad essere simulato con segnali continui (tipo double) limitati solo dalla memoria fisica dell'hardware che esegue l'ambiente virtuale. Il codice del sistema di controllo considera invece dei segnali, definiti dai tipi precedentemente assegnati, valutati in un dominio di tempo discreto, ad intervalli di tempo ben definiti (10ms). In ambiente Matlab/Simulink è possibile implementare una funzione che interpreti il codice generato eseguendolo ad intervalli di tempo definito (*fcncall*), come da layout di simulazione riportato in Figura 63.

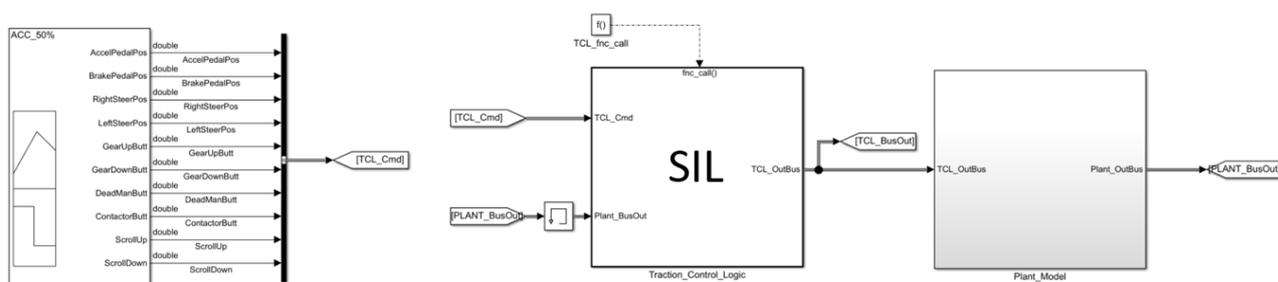


Figura 63: Layout test Software in the Loop

L'analisi delle eventuali differenze tra valori di output del codice e del modello simulativo deve avvenire a parità di input. Per questo motivo i test in SIL sono stati eseguiti considerando gli stessi segnali di input già analizzati per i test in MIL. Nelle figure che seguono verranno sovrapposti i risultati di simulazioni ottenuti in ambiente MIL e SIL, in particolare:

- La Figura 64 compara, a parità di input, le risposte del modello dinamico del sistema di controllo e del relativo codice generato, facendo riferimento al soddisfacimento delle modalità operative disponibili in modalità Charge Depleting. La risposta del modello, ed i segnali di coppia richiesti alla macchina elettrica dal controllo, sono perfettamente sovrapponibili in entrambe le configurazioni di test. L'unica sostanziale differenza tra i due test è che nell'ambiente MIL i segnali di comando, ed interni, sono di tipo continuo ed è sempre possibile definire il valore di qualsiasi funzione tra un'istante di tempo e l'altro. In ambiente SIL i segnali di comando sono di tipo discreto, in quanto anche il codice che definisce l'EMS è elaborato ad intervalli di tempo ben definiti. Tra due chiamate a funzione, i valori rimangono fissi all'ultimo valore disponibile. Le

PARTE II

Materiali e Metodi

considerazioni sul comportamento del veicolo e del sistema di controllo che emergono dall'analisi della Figura 64 sono del tutto analoghe a quelle già discusse per il test riportato in Figura 60.

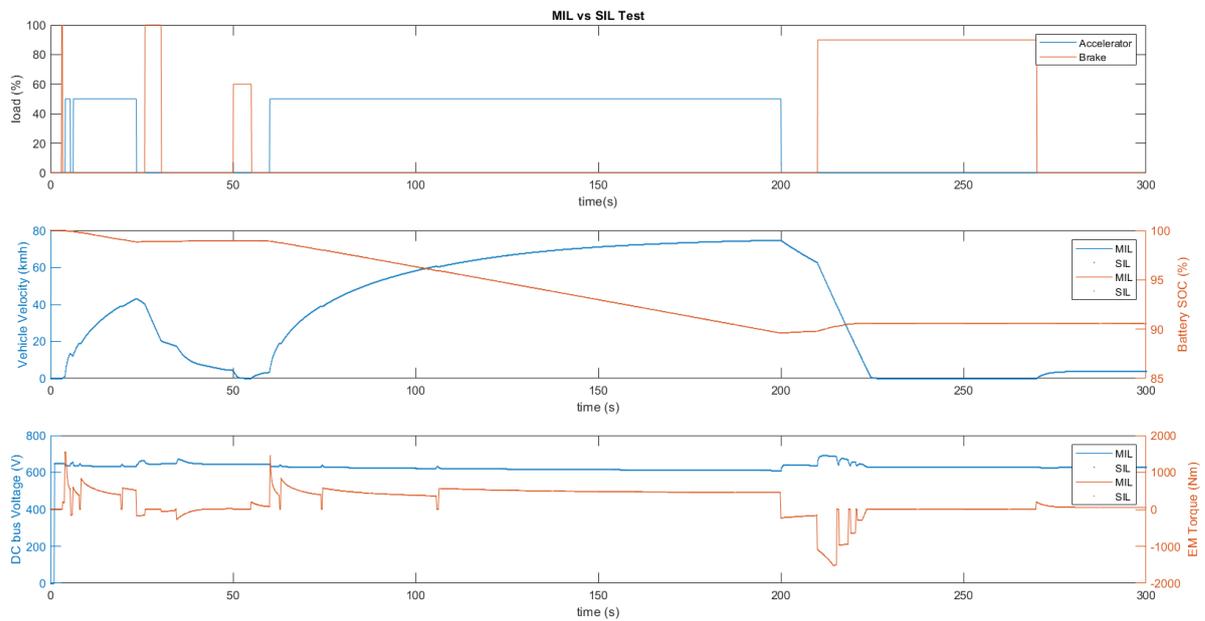


Figura 64: confronto risposte in ambiente simulativo MIL e SIL per la verifica del rispetto dei requisiti

Anche per le modalità di funzionamento in Charge Sustaining e Stationary Charge non esistono praticamente differenze tra risposta del controllo valutato in test MIL e risposta del controllo valutato in test SIL, come riportato in Figura 65 e Figura 66. Si può quindi concludere che il codice C che descrive l'EMS non necessita di modifiche e può essere testato in ambiente HIL.

PARTE II

Materiali e Metodi

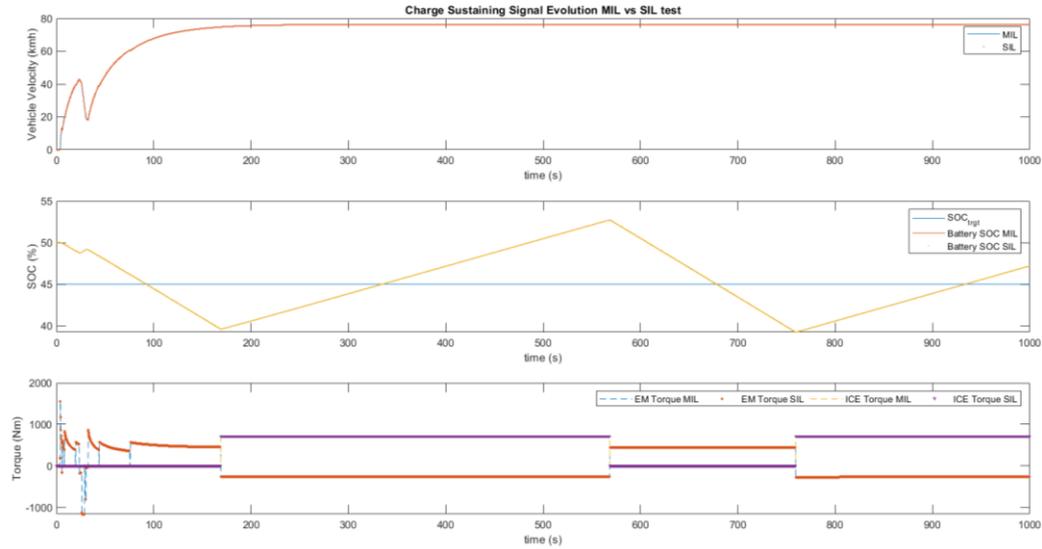


Figura 65: Confronto delle risposte simulative in ambiente MIL e SIL durante l'attivazione della modalità Charge Sustaining

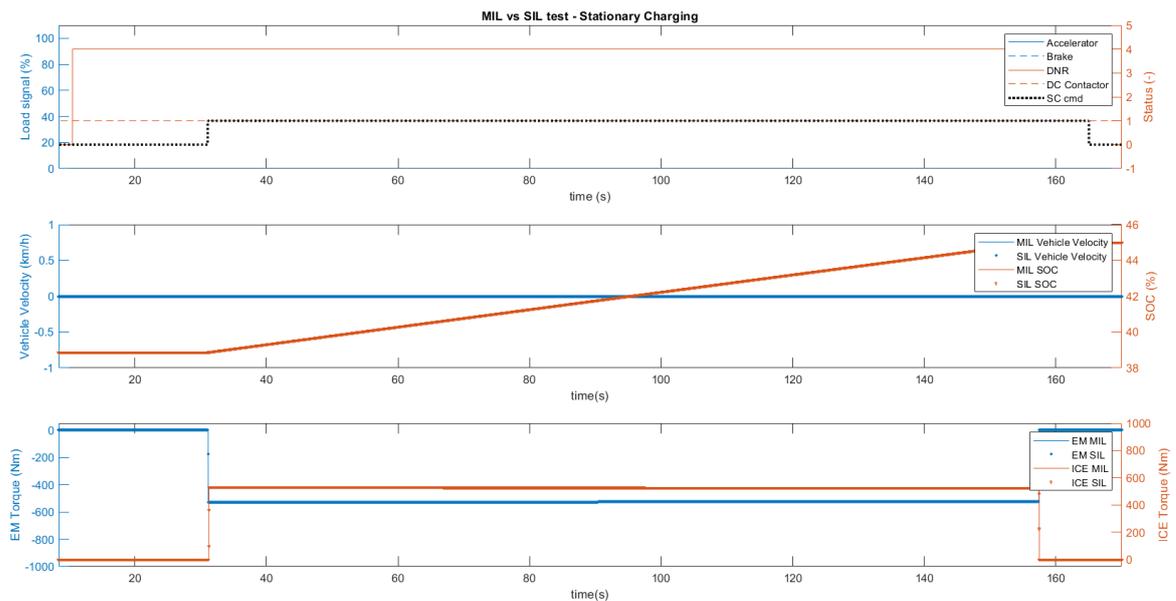


Figura 66: Confronto delle risposte simulative in ambiente MIL e SIL durante l'attivazione della modalità ricarica stazionaria

3.6. Test Hardware in The Loop

Come già anticipato, le procedure di test HIL prevedono che codice dell'Energy Management System, già valutato nelle simulazioni SIL, venga eseguito sull'hardware fisico a cui è destinato. Per poter eseguire questi test è necessario che la centralina di controllo su cui è implementato il codice sia in grado di comunicare in maniera adeguata con un sistema che risponda ai segnali di

PARTE II

Materiali e Metodi

interfaccia, sia in ingresso che in uscita. Il codice che simula il comportamento dell'oggetto da controllare deve quindi essere eseguito su una piattaforma che abbia un sistema operativo in grado di gestire gli ingressi e le uscite (I/O) in tempo reale, così come un sistema di interfaccia hardware appropriato. La Figura 67 mostra una rappresentazione schematica di un generico impianto per il test di sistemi di controllo.

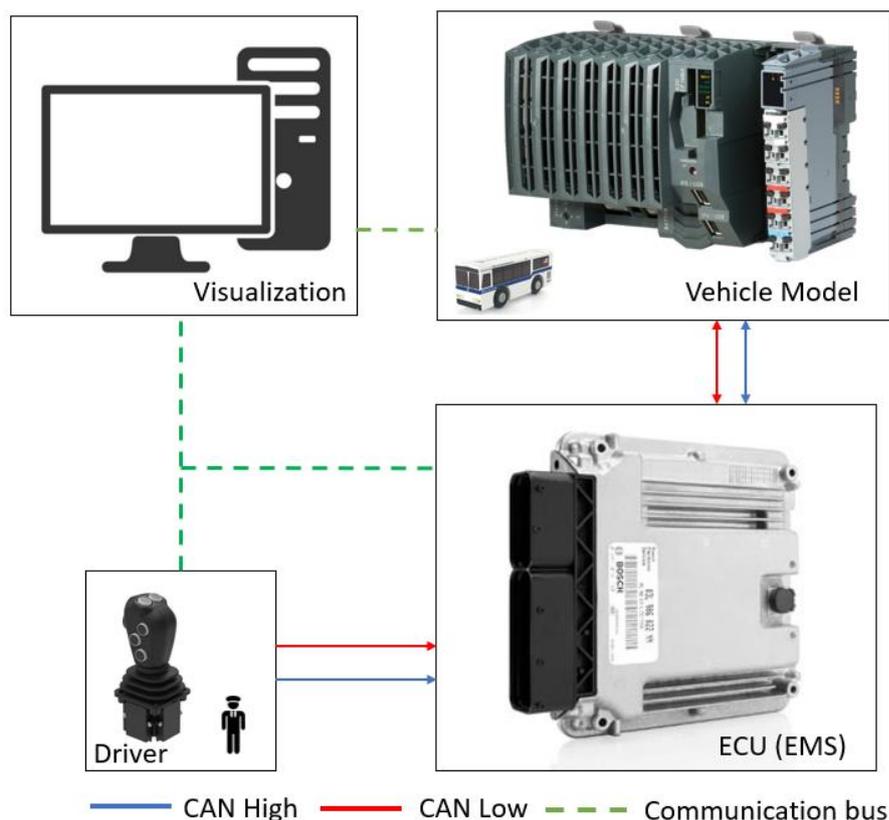


Figura 67: Layout di un impianto per il test *Hardware in The Loop*

La Figura 67 denota l'importanza del sistema di interfaccia tra la centralina che ospita il controllo e l'hardware che ospita la matematica del modello, in questo caso un veicolo. L'interfaccia deve essere in grado di gestire i segnali in tempo reale e risolvere i problemi di ritardo tra i due applicativi. In automotive il sistema di interfaccia più comune si basa sulla comunicazione tramite protocollo CAN-bus, ma non è raro riscontrare l'applicazione di altre tipologie di comunicazione, come CAN-FD o LIN.

L'architettura sviluppata per questo studio, sviluppata in collaborazione con Pure Power Control S.r.l., è composta principalmente da:

PARTE II

Materiali e Metodi

- Un controllore logico programmabile (PLC) prodotto da B&R che è utilizzato per gestire il modello del veicolo;
- Un unità di controllo elettronico (ECU) prodotta da BOSCH, con specifiche automotive, utilizzata per implementare la matematica del sistema di controllo;
- Un Joystick prodotto da ELOBAU per simulare i comandi provenienti dal driver.

Tutti questi componenti comunicano tra loro grazie al protocollo di comunicazione CAN-bus con specifiche riferite al protocollo internazionale SAE J1939 .

L'architettura richiede due diverse tensioni di alimentazione, che vengono fornite da due alimentatori DC. Il primo alimentatore in DC è utilizzato per alimentare l'ECU, il Joystick di comando esterno e alcune ventole di raffreddamento tramite una tensione di 12V. Il secondo alimentatore, che eroga una tensione di 24V, è utilizzato per fornire energia al PLC. La Figura 68 mostra uno schema dell'alimentazione elettrica dell'apparecchiatura di test.

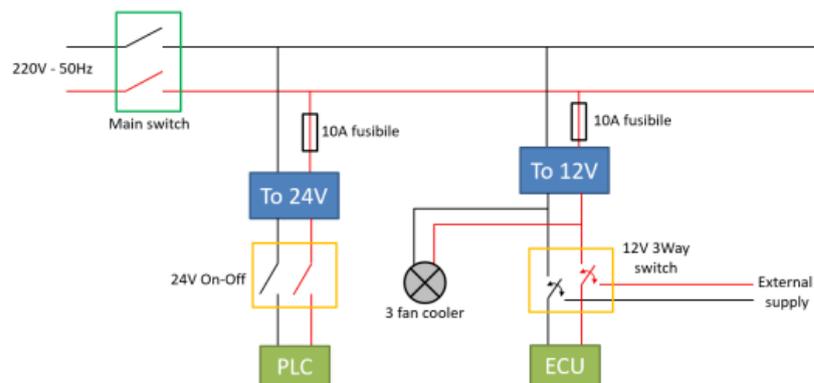


Figura 68: Schematico degli alimentatori

Nelle pagine successive verranno analizzati i tre principali componenti dell'architettura del simulatore HIL e la loro interazione, ossia il PLC, il joystick e l'ECU.

3.6.1. Controllore Logico Programmabile (PLC)

L'hardware che ospita il modello dinamico del veicolo è basato sul sistema X20 di controllori logici programmabili della B&R Industrial Automation GmbH. Il sistema X20 si presta a svariati utilizzi grazie alla sua compattezza ed alta versatilità, considerando che è stato progettato con la possibilità di ospitare moduli di espansione per integrare componenti hardware aggiuntivi. La

PARTE II

Materiali e Metodi

configurazione base del X20 è dotata di una CPU Intel® Atom™ ad alte prestazioni (fino a 1,6 GHz) con 512 MB di RAM DDR2 e 1 MB di SRAM. Prevede diverse accessi I/O cablati, tra cui ingressi e uscite analogiche e digitali, nonché porte di comunicazione digitali, tra cui USB, RS232, CAN-bus, Ethernet, Powerlink e protocolli UDP. La Figura 69 mostra un'immagine rappresentativa e lo schema dell'architettura del modulo X20.

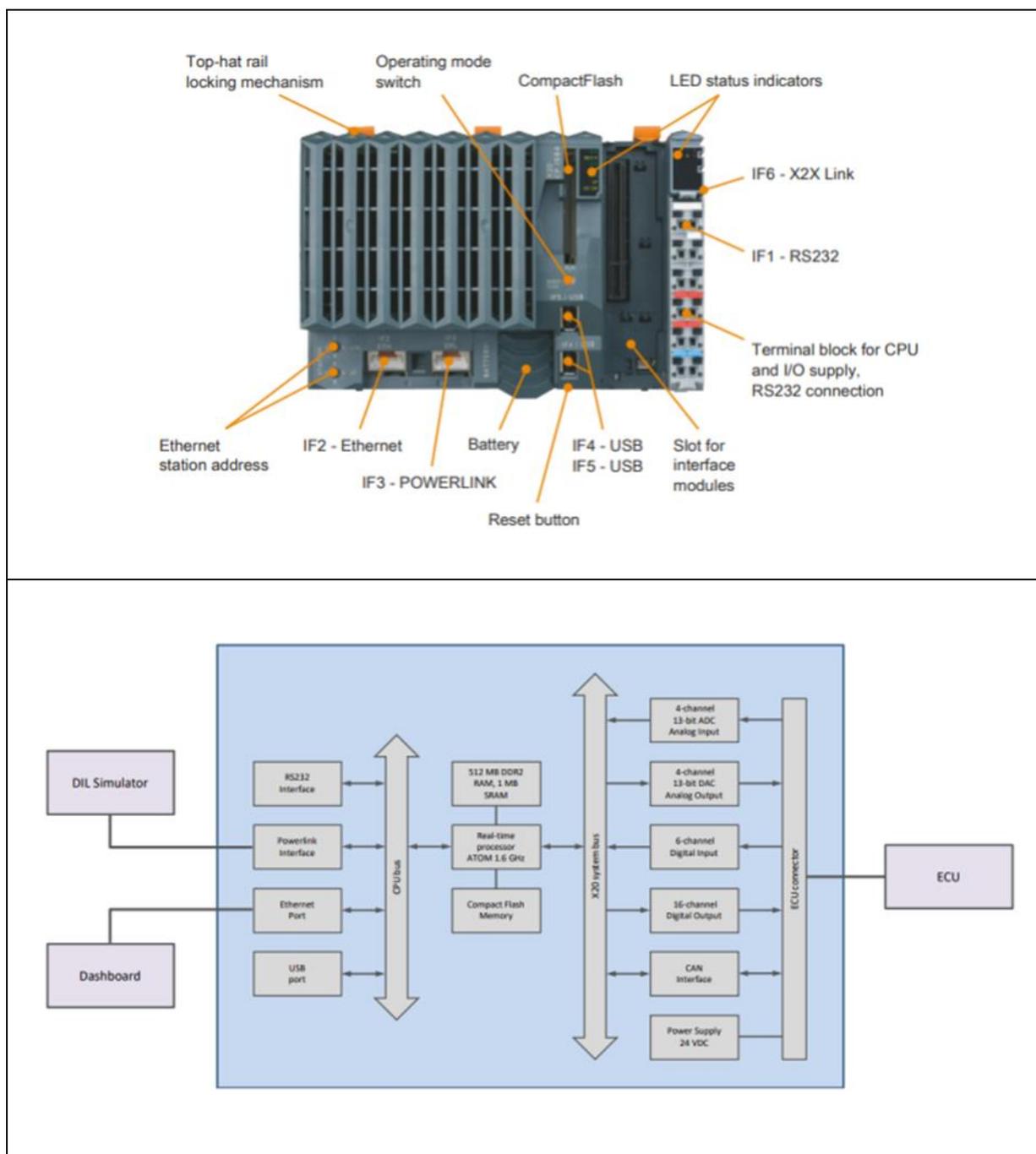


Figura 69: Immagine rappresentativa e diagrammi a blocchi dell'architettura del modulo X20(c)CP158x

PARTE II

Materiali e Metodi

Il simulatore in tempo reale X20 è integrato con interfacce I/O analogiche e digitali, che possono essere utilizzate per collegare componenti esterni come le elettrovalvole o per emulare l'accensione delle chiavi (KL15) nel caso di segnali digitali. Le interfacce possono essere utilizzate sia come ingresso che come uscita e ogni modulo è dotato di un modulo ADC/DAC integrato. Il sistema è composto da 4 moduli analogici, per un totale di 16 porte I/O analogiche e due moduli digitali per un totale di 6 ingressi e 16 uscite. I dettagli sull'unità di elaborazione, sull'I/O e sulla comunicazione digitale sono presentati in Tabella 41.

Tabella 41: Dati tecnici riguardo i sistemi di interfaccia del modulo X20

PLC	Component	Quantity	Note
Processor	CPU B&R X20CP1586	1	X20 CPU ATOM 1.6 GHz 512 MB DDR2 RAM, 1 MB SRAM CompactFlash removable program memory 4 Lithium batteries 3 V / 950 mAh button cell 2 USB ports 1 RS232 interface 1 Ethernet port 10/100/1000 Base-T 1 POWERLINK interface
Interfaces	CAN Interface B&R X20IF1072	1	The interface module can be used to expand the X20 CPU for specific applications
Connector	BUS module B&R X20BM11	4	Internal I/O power supply connected through
Analog Input	B&R X20AI4622	1	4 Input with 13-bit (including sign) digital converter resolution
Analog Output	B&R X20AO4622	1	4 outputs with 13-bit (including sign) digital converter resolution
Digital Input	B&R X20DI6373	1	6 Input
Digital Output	B&R X20DOF322	1	16 Outputs for 1-wire connections. The module is designed for source output wiring

La programmazione del PLC è avvenuta tramite il software Automation Studio, sviluppato da B&R con lo scopo di rendere agevole la programmazione dei controllori logici oltre che le operazioni di interfaccia con software sviluppati da terze parti.

3.6.2. Automation Studio

B&R Automation Software riunisce tutti i pacchetti software necessari per la configurazione, la programmazione, la diagnosi e il funzionamento di tutti i sistemi di controllo, dei sistemi di movimento e dei sistemi a pannello B&R. I vari pacchetti software comprendono anche “Automation Studio – Target for Simulink”, che è stato utilizzato per la compilazione del codice della matematica del veicolo, integrato nel PLC tramite porta ethernet. Definiti i segnali di interfaccia tra veicolo e mondo esterno, tramite il tool è stato possibile configurare tali segnali, verificare la completezza di informazioni, definire il target hardware di applicazione e generare il codice. Per poter generare il codice da implementare sul PLC è stato necessario definire il tipo

PARTE II

Materiali e Metodi

per ogni variabile in ingresso ed in uscita dal modello matematico del veicolo (Tabella 39). Il tipo da assegnare alla variabile è stato scelto in accordo con i possibili valori assumibili dalla variabile stessa, ossia valore massimo e minimo ammissibile.

Definita l'interfaccia e compilato il codice, sono stati definiti i compiti da far eseguire al processore così come la loro periodicità. Nei sistemi multitasking, la divisione dei compiti offre i seguenti vantaggi:

- Crea una struttura solida e controllabile dell'applicazione.
- Ogni task viene creato nel linguaggio di programmazione più adatto.
- Possono essere programmate le singole funzioni e testarle (modularità).
- In caso di manutenzione, è più semplice operare sul singolo task.

Dopo aver definito le operazioni da eseguire per ogni task è necessario programmare la loro periodicità. I task più importanti o critici a livello temporale vengono eseguiti con passo temporale minore rispetto a classi di importanza secondaria o meno critica. Solitamente le classi di media o bassa priorità sono eseguite dal gestore di sistema (ossia il sistema operativo), le classi di alta priorità invece sono attivate da interrupts o segnali di abilitazione. Lo studio ha coinvolto la creazione di quattro task, due definite e due disponibili per sviluppi futuri del sistema. Le due task disponibili sono la task Plant e la task CAN, le due opzionali sono la task UDP e la task HMI.

La task Plant considera tutte le operazioni matematiche che devono essere svolte per valutare la risposta del modello dinamico del veicolo. Il sistema, quindi, eseguirà le operazioni di calcolo ogni volta che verrà attivata questa task.

La task CAN considera tutte le operazioni necessarie all'interpretazione dei messaggi in arrivo sul bus CAN, così come le operazioni necessarie all'invio dei messaggi sul bus di comunicazione.

La task UDP considera tutte le operazioni necessarie all'interpretazione dei messaggi in arrivo ed in uscita tramite l'applicazione del protocollo UDP

PARTE II

Materiali e Metodi

La task HMI considera tutte le operazioni necessarie all'interpretazione dei messaggi scambiati con un'interfaccia uomo macchina. Le periodicità assegnate ad ogni task sono mostrate in Tabella 42.

Tabella 42: Task e cycle time

Task	Time
Plant	2 ms
UDP	3 ms
CAN	10 ms
HMI	100 ms

3.6.3. Il joystick

Il joystick compatto J2 di ELOBAU viene utilizzato nei trattori per il controllo del caricatore frontale o nei carrelli industriali per il controllo delle forche. Nel caso specifico è stato utilizzato per emulare i comandi provenienti dal guidatore del veicolo, in quanto permette con una singola interfaccia CAN di simulare diverse operazioni richieste dal guidatore, sfruttando i pulsanti integrati nell'impugnatura per il comando di funzioni aggiuntive. Ogni pulsante è associato a una funzione specifica e, in alcuni casi, ci si serve di una combinazione dei comandi per ottenere la richiesta di un'azione, come l'inserimento del park o la richiesta di ricarica stazionaria. La Figura 70 mostra un'immagine rappresentativa del Joystick.



Figura 70: J2 Joystick prodotto da ELOBAU

PARTE II

Materiali e Metodi

Il Joystick è molto compatto, affidabile e produce segnali di uscita analogici (corrente/tensione, anche ridondati) o uscita di commutazione. È possibile interfacciare il controllore con altri dispositivi con connessione CAN bus (CANopen / SAE J1939)

In Tabella 43 sono presentate le specifiche elettriche del Joystick.

Tabella 43: Dati tecnici Joystick J2

Attribute	J2CJ
Polarity reversal protection	yes
EMC immunity (Norm)	DIN EN 13309, DIN EN ISO 14982, ISO 13766, DIN EN 12895
EMC emission (Norm)	DIN EN 13309, DIN EN ISO 14982, ISO 13766, DIN EN 12895
Operating voltage min.	9 V DC
Operating voltage max.	36 V DC
Current consumption	< 120 mA
Short-circuit resistance to GND	yes
Short-circuit resistance to supply	yes
Technology	Hall
Protocol	J1939
Node ID / Source Address	0x70
Transmitting cycle	100 ms
Baud rate	250 kBit/s
Bus terminating resistor	no

3.6.4. L'Unità di Controllo Elettronico

L'unità di controllo elettronico, il cui cuore operativo è il processore TriCore TC1724 (80 MHz), è in grado di essere utilizzata in diversi ambiti applicativi grazie ai numerosi punti di interfaccia da e verso l'esterno di tipo analogico o digitale, oltre ai protocolli di comunicazione standard con cui è compatibile (CANopen, J1939, UDS). Lo scopo dello studio è verificare che il software possa essere implementato in un hardware che rispetti le specifiche automotive, come quello utilizzato nel banco di test. Lo studio, quindi, prescinde dal marchio di fabbrica o sui tool specifici per l'implementazione del codice generato sull'hardware fisico, spesso dipendenti dal produttore. Considerata la natura dello studio e per motivi di segretezza industriale, la centralina verrà quindi considerata come una black box in grado di eseguire il codice del sistema di controllo nei tempi definiti dalle task e di interfacciarsi con il controllore logico programmabile e con il joystick. Non verrà quindi discussa nel dettaglio né l'operazione di implementazione del

PARTE II

Materiali e Metodi

codice in centralina, né le fasi di elaborazione del codice di basso livello della centralina. Maggiori dettagli verranno discusse invece riguardo le operazioni di comunicazione tra centralina e PLC.

La centralina riceve i segnali tramite le interfacce con il mondo esterno che vengono elaborati tramite delle funzioni di codifica cicliche. Il segnale elaborato viene quindi processato dal codice implementato e restituisce i segnali di comando. Tramite l'operazione opposta, i segnali di comando vengono elaborati tramite funzioni cicliche e codificati per essere compatibili con il protocollo di comunicazione CAN. Operazioni analoghe vengono eseguite da tutti i dispositivi (nodi) collegati al bus di comunicazione CAN, come anche dal PLC. Nel caso del controllore logico programmabile, l'algoritmo di interpretazione dei segnali (mostrato in Figura 71) esegue prima di tutto l'inizializzazione dell'interfaccia CAN, dove viene abilitata la comunicazione e vengono caricate tutte le impostazioni richieste (ID dell'interfaccia, baud-rate, 11 o 29 bit per l'ID). Dopo la prima fase di configurazione/inizializzazione, inizia il ciclo del codice di gestione di interfaccia. Il processo si articola in quattro fasi: la prima fase è quella di inizializzazione in cui viene controllato lo stato dell'interfaccia CAN e viene acquisito l'indirizzo del controllore. Se non si verificano errori, il codice esegue il comando successivo, `STEP_PREPARE_READ`, in cui l'interfaccia abilita la modalità di lettura e acquisisce l'indirizzo e l'ID dei dati da leggere. Se lo stato dell'interfaccia non mostra alcun errore, viene abilitato l'effettivo processo di lettura e scrittura dei messaggi. In questa fase vengono utilizzate due funzioni per interpretare il messaggio in ingresso da segnale CAN esadecimale e per convertire i messaggi in uscita in segnali CAN esadecimali. Le due funzioni richiedono l'ID dei messaggi e l'indirizzo. La struttura è riportata nell' Allegato A.1.

Il codice è scritto utilizzando le librerie di Automation studio, che consentono di ottenere una comunicazione veloce e affidabile tra i dispositivi collegati al bus. La libreria per la comunicazione CAN fornisce tutte le funzioni necessarie per la comunicazione, alcune delle quali sono:

- `CAN Init`: inizializza l'interfaccia hardware CAN e crea le sessioni di conversione in base al database CAN selezionato.
- `CAN.error`: chiude l'interfaccia hardware CAN e tutte le sessioni di conversione.
- `CAN.status`: restituisce lo stato del ricetrasmittitore CAN e in caso di errori resetta l'interfaccia.
- `CAN.writeData`: invia tramite CAN tutti i frame grezzi presenti nella coda di trasmissione.

PARTE II

Materiali e Metodi

- CANreadData: legge tutti i frame disponibili dal driver CAN e li invia alla conversione attraverso la coda di lettura.
- Decodifica CAN: converte tutti i frame letti in segnali significativi. La "decodifica" viene effettuata in base alla descrizione dei segnali nel database CAN.

I messaggi vengono impacchettati con la tecnica del bit-shifting, poiché alcuni segnali sono espressi con 8 e 16 bit, dotati di segno (positivi o negativi) o senza segno (solo positivi). Un esempio di pacchetto di messaggi inviato da uno dei nodi del veicolo è presentato nell'Allegato A.1. Ogni segnale di coppia è espresso con una risoluzione di 16 bit, ciò implica che venga suddiviso in due segnali a 8 bit. I primi 8 bit corrispondono agli 8 bit originali dei segnali, mentre il secondo frame di 8 bit è ottenuto dallo spostamento a destra di 8 bit del messaggio originale, che si ottiene semplicemente dividendo il messaggio per 256. I segnali vengono poi ricostruiti dal ricevitore durante il processo di lettura.

Il segnale completo, sul lato ricevente, viene ricostruito utilizzando uno shift a sinistra sul secondo frame di 8 bit. Lo stesso ragionamento viene applicato per i messaggi in ricezione con spostamento a destra.

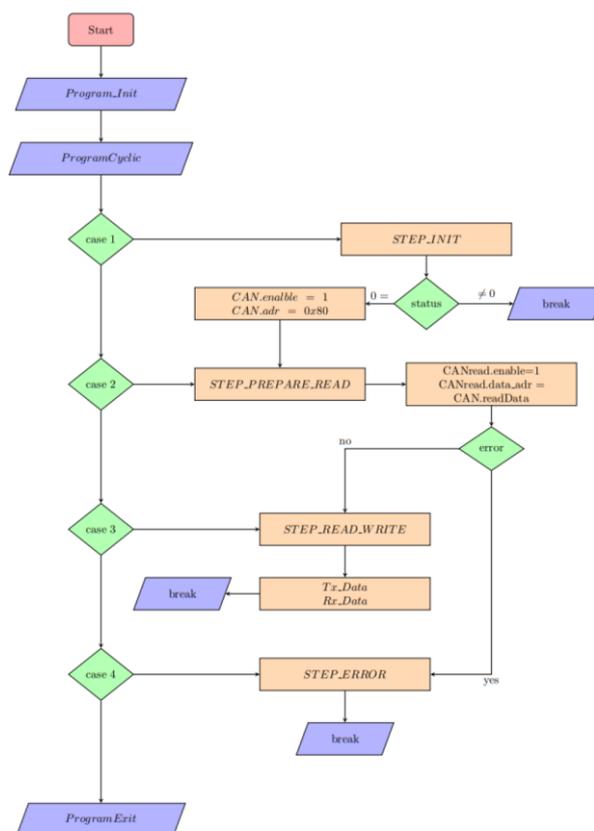


Figura 71: Diagramma di flusso dei processi di lettura e scrittura dei messaggi su CAN bus

2.9.5 Fase di Test e Validazione HIL

I test svolti in HIL servono a verificare che il codice implementato nell'hardware sia in grado di elaborare correttamente i segnali in ingresso e restituire sei segnali di comando congruenti. Rispetto al SIL, non solo codice di controllo e modello da controllare sono implementati in due nodi di calcolo differenti, ma entrambi sono eseguiti da due hardware differenti che comunicano tramite un bus di comunicazione fisico soggetto a specifici protocolli. Il test in HIL è estremamente utile per testare non solo la centralina, ma anche le funzioni che definiscono e regolano la comunicazione tra i dispositivi. Durante la procedura di test sono state eseguite delle manovre atte a verificare il rispetto dei requisiti e la risposta del sistema è stata visualizzata intercettando i segnali scambiati su CAN-bus tramite lo strumento di acquisizione "CANalyzer", prodotto dalla Vector. Dalla linea CAN sono stati acquisiti i segnali di comando del Joystick, i segnali in ingresso ed in uscita alla centralina e quelli in ingresso e uscita dal PLC. I segnali di input sono stati riutilizzati in ambiente di test SIL in modo da confrontare la risposta del codice nelle due configurazioni di test. La Figura 72 compara la risposta del veicolo e del sistema di controllo agli input del driver in modalità di funzionamento Charge Depleting. Dalla figura emerge che sia in ambiente SIL che HIL il comportamento del veicolo è il medesimo, così come i segnali di coppia comandata alla macchina elettrica.

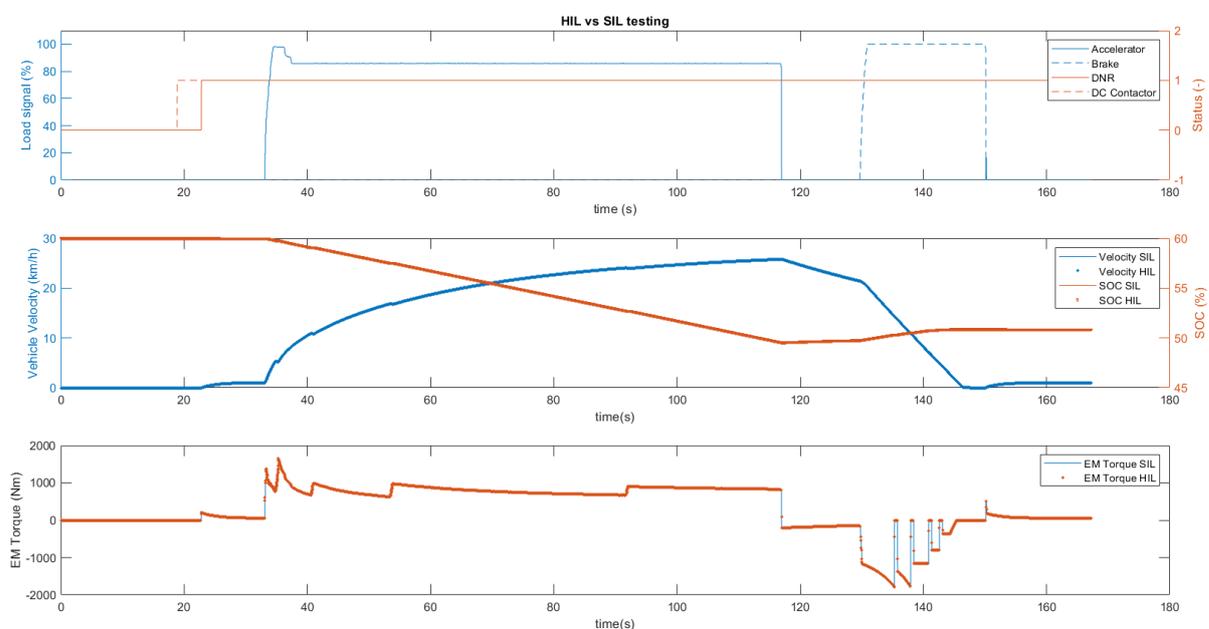


Figura 72: Charge Depleting, confronto tra risposte valutate in ambiente di test SIL e HIL

PARTE II

Materiali e Metodi

Anche in questo caso è presente la coppia di Compression, Creep e frenata rigenerativa nelle condizioni di funzionamento definite dai requisiti. Le funzioni che regolano lo scambio dei messaggi tra i diversi nodi presenti sulla rete riescono ad interpretare correttamente il valore dei messaggi nei tempi previsti. La Figura 73 riporta il confronto tra test SIL e HIL nella verifica del requisito di disattivazione della frenata rigenerativa in condizioni di funzionamento critiche per la batteria, mentre in Figura 74 è riportato il test sulla verifica del requisito legato alla ricarica stazionaria del veicolo. In entrambe le condizioni di test il sistema di controllo rispetta i requisiti sviluppati nella fasi iniziali della progettazione del ciclo a V. La Figura 75 mostra il confronto tra i test svolti in ambiente SIL ed HIL per la verifica del rispetto dei requisiti inerenti alla modalità di funzionamento Charge Sustaining. Sia i segnali di comando di coppia alla macchina elettrica che al motore termico sono congruenti in entrambe le tipologie di test, ciò permette al sistema di controllo di mantenere lo stato di carica della batteria entro i livelli definiti dai requisiti. Si può quindi concludere che:

- 1) il sistema di controllo è modellato correttamente e riesce ad imporre al veicolo le funzionalità oggetto dei requisiti;
- 2) il codice di controllo è stato compilato correttamente ed è possibile eseguirlo su centraline fisiche che rispettino gli standard automotive;
- 3) l'interfaccia di comunicazione tra ECU e mondo esterno è stata configurata correttamente; non si riscontrano errori nell'interpretazione dei messaggi, né in ingresso né in uscita dalla centralina o negli altri nodi del bus di comunicazione.

PARTE II
Materiali e Metodi

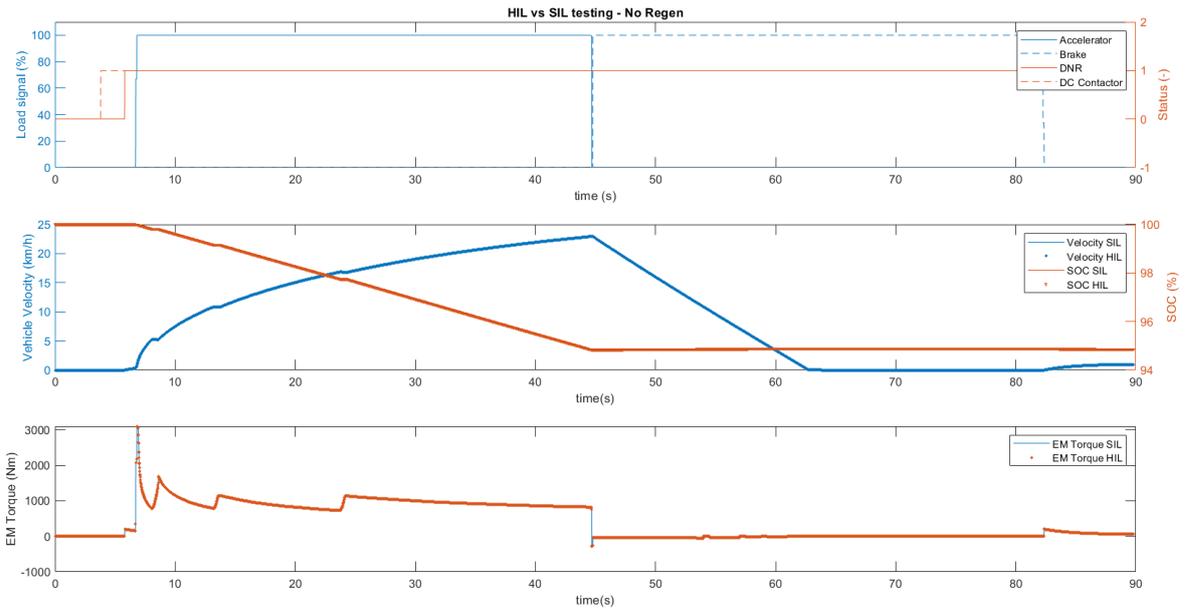


Figura 73: Disattivazione della frenata rigenerativa, confronto tra risposte valutate in ambiente di test SIL ed HIL

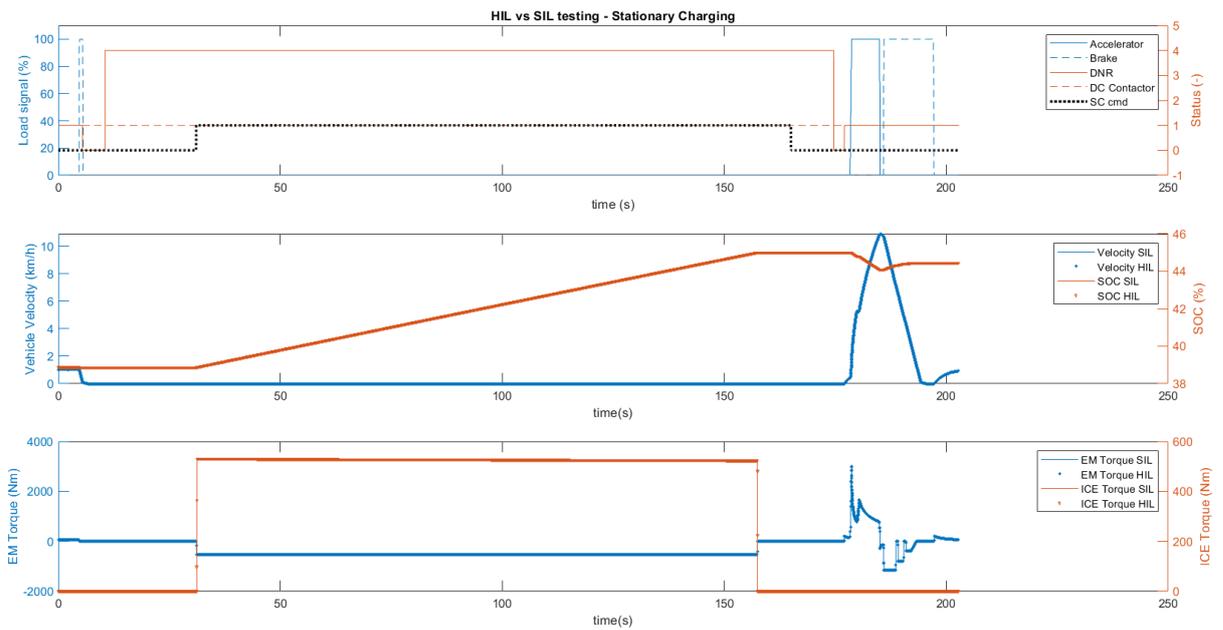


Figura 74: Modalità ricarica stazionaria, confronto tra SIL e HIL

PARTE II

Materiali e Metodi

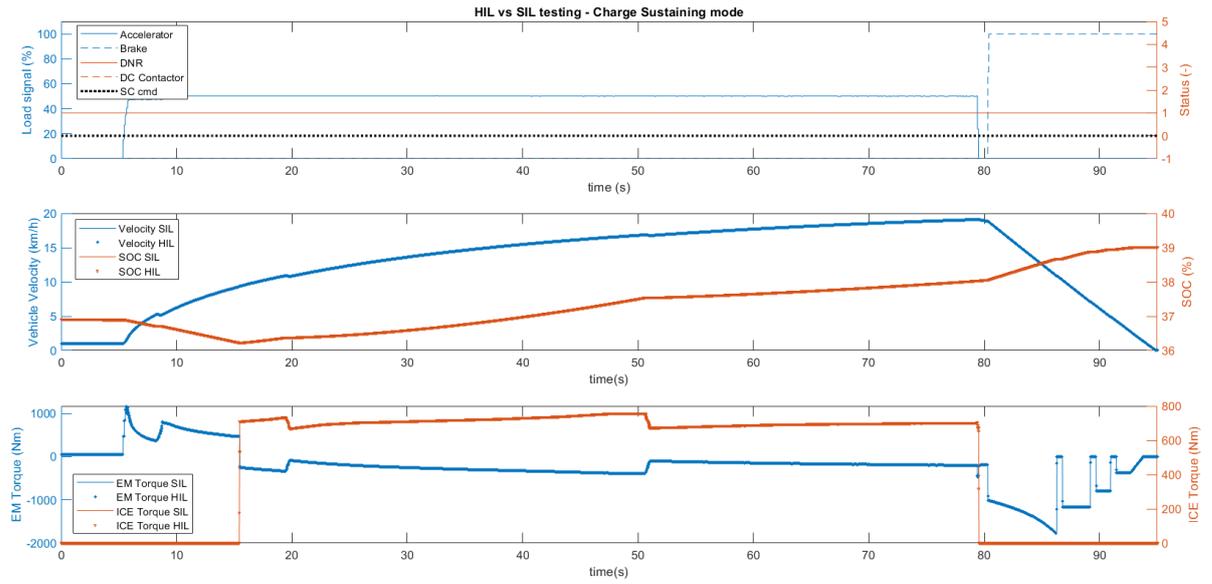


Figura 75: Charge Sustaining, confronto tra test HIL e SIL

4. RISULTATI

Le fasi di progettazione e test del sistema di controllo hanno prodotto un software in grado di gestire l'unità di potenza del veicolo oggetto di studio, completo sia nella definizione delle logiche, sia in termini di parametri di calibrazione. Le operazioni di ottimizzazione, con l'obiettivo di definire i valori di calibrazione che massimizzino l'efficienza energetica del veicolo, sono state svolte considerando come dati di input i profili di velocità standardizzati sviluppati da centri di ricerca e unità governative. Sebbene offrano un ausilio valido alla progettazione, non è necessariamente vero che il veicolo affronterà, durante il suo esercizio, dei profili di carico analoghi a quelli dei cicli di guida standardizzati. Per loro natura i cicli standardizzati rappresentano una media delle condizioni operative di un veicolo che esercita le sue funzioni in un particolare paese o città, o possono essere frutto di particolari operazioni matematiche che non coinvolgono direttamente un profilo di velocità acquisito. Per verificare sia le prestazioni del veicolo che i parametri di calibrazione, è stato condotto uno studio su una tratta reale percorsa all'interno della città di Messina. Questo studio si propone di confrontare le prestazioni del veicolo durante la percorrenza di una tratta urbana considerando vari parametri di calibrazione. Verrà infine ipotizzato uno scenario di comunicazione tra veicolo e città, nella quale quest'ultima imporrà al veicolo la percorrenza di specifiche distanze in modalità Charge Depleting, al fine di limitare l'emissione di agenti inquinanti in specifiche zone.

4.1. Trasporto Pubblico nella Città di Messina

ATM SpA (Azienda Trasporti Messina) è una società a totale partecipazione pubblica e si occupa del servizio di trasporto pubblico locale nella città dello Stretto. La flotta della società conta 104 veicoli, di cui 16 elettrici, che giornalmente coprono 36 linee urbane, 41 considerando i servizi navetta ed universitari. La particolare conformazione morfologica della città di Messina fa sì che gli autobus della flotta siano impegnati in linee con caratteristiche quasi opposte: circa la metà delle linee si sviluppa percorrendo la città al livello del mare su strade poco tortuose ma soggette al traffico cittadino; la distanza media di queste tratte è di circa 22.5 km. L'altra metà delle linee coprono le aree urbane lungo i principali torrenti o fiumare della città, in cui le strade sono caratterizzate da pendenze più o meno pronunciate e più strette e tortuose rispetto a quelle che si sviluppano al livello del mare; la distanza media di queste tratte è di circa 10 km. La Figura 76 mostra la distribuzione delle linee sul territorio comunale.

PARTE II

Materiali e Metodi

Al fine di individuare una linea che potesse rappresentare la media tra quelle offerte dal servizio pubblico, è stata condotta un'analisi delle caratteristiche morfologiche e cinetiche delle stesse considerando come parametri caratteristici: la pendenza minima, la pendenza massima, la pendenza media, l'altitudine media, la distanza percorsa, il numero fermate previste, il rapporto tra numero di fermate e distanza della linea e la tipologia di strada percorsa lungo la linea. Le tipologie di strade si dividono in: strade primarie, strade secondarie, strade terziarie, strade residenziali e autostrade. I parametri delle strade sono stati estratti dal database openstreetmaps e intersecati con i percorsi specifici in un ambiente GIS (Arcgis 10.x). A partire dalle caratteristiche dei cicli è stata condotta un'analisi di clusterizzazione tramite la *two step analysis cluster*, in modo da suddividere le tratte in tre cluster. I risultati dell'analisi di clusterizzazione sono riportati in Tabella 44 e mostrati in Figura 76.

Tabella 44: Definizione dei cluster

ID Cluster	Principale tipologia di percorso	Tratte
1	Urbano	6,7,11,14,16,19,36
2	Extraurbano	2,3,25-30,33
3	Misto	1,4,5,8-10,12,13,15,17,18,20-24,31,34,35

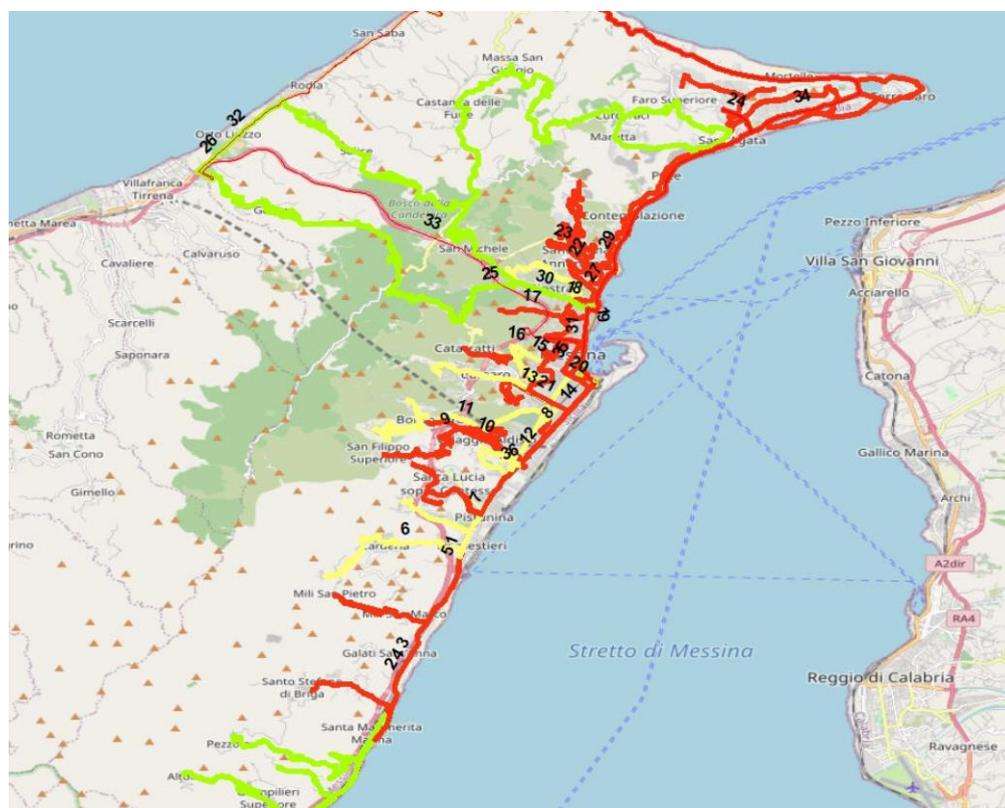


Figura 76: Distribuzione delle linee Bus all'interno del territorio comunale di Messina; cluster 1 in giallo, cluster 2 in verde e cluster 3 in rosso

PARTE II

Materiali e Metodi

Dall'analisi emerge che il *cluster tre* raccoglie le linee che presentano delle caratteristiche medie tra tutte le linee disponibili, non a caso raccoglie il maggior numero di linee. Tra le linee presenti nel cluster 3, la linea 24 è quella che dimostra una minor distanza dal centro del cluster; si può quindi assumere che la linea 24 rappresenti la totalità delle linee analizzate. Lo studio che segue considererà solo la linea 24 per la valutazione delle efficienze energetiche del sistema, sia per ragioni logistiche sia per le caratteristiche della linea stessa, sebbene le analisi condotte e le conclusioni tratte siano estendibili alla totalità delle linee offerte dal servizio di trasporto pubblico.

4.2. La linea 24

La linea 24 serve principalmente la zona centrale e nord della città di Messina. Il percorso di andata della linea inizia al “Terminal Museo” e termina in “C.da Badessa”, il percorso di ritorno è analogo ma con capolinea invertiti. Considerando andata e ritorno, la linea prevede la percorrenza di circa 29 km in un lasso di tempo, comprendendo anche i periodi di sosta ai capolinea, di circa 1h.

Per poter ottenere dei dati più significativi circa la linea, è stata effettuata una misurazione del profilo di velocità di un autobus impegnato nel percorrerne una tratta completa (andata/ritorno). L'acquisizione del profilo di velocità è avvenuta tramite l'applicazione TrackAddict, un tool sviluppato da HP Tuners che permette di acquisire e registrare la posizione del dispositivo su cui viene eseguita l'applicazione. Tramite la registrazione delle coordinate GPS, l'applicativo è in grado di valutare la velocità longitudinale del veicolo, le sue accelerazioni lungo le tre direzioni nello spazio ed il profilo altimetrico della tratta percorsa. Terminata la sessione di acquisizione, l'applicazione fornisce all'utente un file, formato csv, contenente i dati raccolti durante la registrazione e quelli frutto di elaborazioni matematiche (come la velocità). Oltre ai profili cinetici del veicolo, è stato registrato anche il profilo del numero di passeggeri che prendeva posto sul veicolo, per valutare quindi la variazione di massa sull'autobus durante l'esecuzione della tratta.

Le tecnologie utilizzate per l'acquisizione hanno permesso di non installare strumentazioni di misura a bordo del veicolo permettendo di non interferire sul suo normale utilizzo. Le informazioni raccolte sono comunque disponibili per la maggior parte dei fornitori di servizi per il trasporto pubblico. Non è infatti raro che questa tipologia di veicoli sia dotata di un sistema per il rilevamento della posizione o di conteggio del numero di passeggeri. Un servizio ausiliario offerto da quasi tutti i fornitori di trasporto pubblico è quello di indicare, tramite mappe

PARTE II

Materiali e Metodi

interattive, la posizione del veicolo impegnato a coprire una determinata linea, per permettere all'utente di essere aggiornato in tempo reale circa la posizione ed il tempo di attesa in una determinata fermata. Sebbene questi dati siano visibili al cittadino solo tramite le mappe interattive, è plausibile assumere che i fornitori del servizio possono accedere facilmente a questa tipologia di dati.

Oltre al servizio di geolocalizzazione del mezzo, è disponibile anche l'informazione circa la capacità di posti per i passeggeri residua all'interno del veicolo. Questa informazione è di interesse non solo per il cittadino, ma anche per l'autista, che può limitare l'accesso al veicolo quando viene saturata la sua capacità massima. Molteplici sono i dispositivi in grado di valutare il numero di persone a bordo e si basano su diverse tecnologie come la luce strutturata, triangolazione, infrarossi e visione stereoscopica. I dispositivi più all'avanguardia sono dati di algoritmi di intelligenza artificiale in grado di distinguere anche tra adulti, bambini e oggetti esterni (come biciclette).

È chiaro quindi che le informazioni ricavate dall'utilizzo di TrackAddict e dall'operatore che ha eseguito le misure sono disponibili, e presumibilmente anche più accurate, ai fornitori del servizio di trasporto urbano.

La Figura 77 mostra la tratta percorsa dal veicolo durante l'esecuzione della linea 24, il suo profilo di velocità, ed il profilo del numero di passeggeri. La Tabella 45 raccoglie i parametri cinetici del profilo di velocità considerato.

PARTE II

Materiali e Metodi



Figura 77: Dati GPS, profilo di velocità e profilo passeggeri linea 24

Tabella 45: Caratteristiche Cinetiche di una tratta percorsa sulla linea 24

Linea	24 – Terminal Museo – C.da Badessa
Tempo (s)	4001
Distanza (km)	28688
Velocità Max (km/h)	62
Velocità Media (km/h)	25.81
Velocità Media guidata (km/h)	33.46
Numero di stop/km	0.7

Confrontando le caratteristiche cinetiche della linea 24 con quelle dei cicli di guida standard è possibile affermare che il ciclo standard più prossimo è il SORT 3. Come è possibile notare dalla Tabella 46, il SORT 3 è il ciclo di guida standardizzato che si discosta meno in termini di errore percentuale valutato sulla velocità media, velocità massima e velocità media guidata rispetto agli altri cicli di guida.

Tabella 46: Errore percentuale tra tratta acquisita e cicli di guida standardizzati

	Errore Percentuale (%) rispetto ai valori della tratta 1-Linea 24						
	ETC (FIGE) Urban	NYBC	OCTA	WMATA	SORT1	SORT2	SORT3
Velocità Max	-19.35	-8.23	5.84	19.12	-29.53	-30.00	-4.00
Velocità Media	-9.10	-44.79	-23.13	-52.89	-53.08	-30.84	-3.76
Velocità Media guidata	-20.65	-40.23	-24.66	-28.42	-41.42	-20.17	-1.88

PARTE II

Materiali e Metodi

Analogamente a quanto già analizzato per i cicli di guida standardizzati, anche per il profilo di velocità acquisito durante la percorrenza dalla linea 24 è stata condotta la procedura di ottimizzazione per verificare, ed eventualmente quantificare, la differenza tra i parametri che ottimizzano le prestazioni energetiche del veicolo nei vari scenari di guida. I dati di input per la simulazione, oltre che il profilo di velocità acquisito, contengono anche le informazioni circa l'angolo di inclinazione stradale e la variazione di massa dovuta ai passeggeri. Considerando un peso medio di 70 kg per ogni passeggero, la massa statica del veicolo è stata addizionata della massa dei passeggeri, variabile lungo la tratta come mostrato in Figura 77. La procedura di ottimizzazione si è basata sull'algoritmo *Pattern Search*; i parametri oggetto di ottimizzazione, così come i vincoli riguardo i valori ammessi, sono gli stessi di quelli utilizzati precedentemente e riportati in Tabella 35. La procedura di ottimizzazione ha definito ottimi per la tratta acquisita lungo la percorrenza della linea 24 i valori riportati in Tabella 47.

Tabella 47: Set di parametri di calibrazione che ottimizzano l'efficienza energetica del veicolo percorrendo la tratta acquisita lungo la linea 24

Ciclo di guida	Distanza (km)	SOC _{trgt} (%)	Chrg _{ctr} gain (-)	Act _{pwr} (kW)	η_{chrg} (-)	Avg fuel (km/l)	Qc (Ah)
Tratta 1 linea 24	28.68	43.00	1.19	166.88	0.54	8.38	2.499981703

Per le simulazioni si hanno quindi a disposizione tre set di parametri:

- 1) SET1 : i parametri di calibrazione che ottimizzano il consumo di combustibile equivalente e il degrado della batteria durante lo svolgimento del ciclo standardizzato SORT3, ossia il ciclo che dimostra caratteristiche cinetiche più simili al profilo di velocità acquisito sperimentalmente durante l'esecuzione dell'intera tratta della linea 24.
- 2) SET2 : i parametri di calibrazione che ottimizzano il consumo di combustibile equivalente ed il degrado della batteria considerando tutti i cicli di guida standardizzati presentati in questo studio.
- 3) SET3 : i parametri di calibrazione che ottimizzano il consumo di combustibile equivalente ed il degrado della batteria durante la percorrenza dell'intera tratta della linea 24, considerando il ciclo di guida acquisito.

La Tabella 48 raccoglie il valore dei parametri di calibrazione di ogni set, così come il valore di consumo medio di combustibile equivalente, espresso in chilometri al litro, e la perdita di capacità della cella dimostrata a fine ciclo.

PARTE II

Materiali e Metodi

Tabella 48: Risultati simulazioni svolte sulla tratta della linea 24 con i tre SET di parametri

Tratta1 linea 24	SOC _{trgt} (%)	Chrg _{fctr} gain (-)	Act _{pwr} (kW)	η_{chrg} (-)	Avg fuel (km/l)	Qc (Ah)
SET 1	53.00	0.90	182.50	0.68	7.48	2.499981703
SET 2	45.00	0.92	182.5	0.72	8.21	2.499979083
SET 3	43.00	1.19	166.88	0.54	8.38	2.499982156

Dai dati presenti in Tabella 48 emerge come, nonostante il ciclo di guida SORT3 sia quello più prossimo (da un punto di vista cinetico) al profilo di velocità acquisito sperimentalmente, i parametri di ottimizzazione siano differenti dal SET3. Non considerando la variazione della massa complessiva del veicolo, e basandosi solo sulla velocità media di percorrenza, non è possibile affermare che un singolo ciclo di guida possa essere rappresentativo di una tratta stradale.

Confrontando i risultati ottenuti dopo l'applicazione del SET 2 e del SET 3, si nota invece una minor differenza sia tra i valori dei parametri considerati che nei risultati. Il SET 2 è rappresentativo della totalità dei cicli di guida standardizzati, mentre il SET 3 valutato sulla linea 24, scelta in quanto rappresentativa delle linee urbane della città di Messina; in questo caso l'utilizzo dei parametri che ottimizzano le prestazioni del veicolo considerando i sette cicli di guida standardizzati è più proficuo dell'utilizzo dei parametri che ottimizzano il singolo ciclo di guida, nonostante anche questo sia standardizzato. I valori presenti in Tabella 48, inoltre, dimostrano il peso del valore di SOC_{trgt} nella gestione energetica rispetto al valore degli altri parametri di calibrazione. La Figura 78 mostra il profilo di velocità di riferimento e quello del veicolo, valutato tramite le simulazioni, considerando i tre set di parametri. In figura è presente anche l'evoluzione dello stato di carica della batteria durante la percorrenza della tratta.

PARTE II

Materiali e Metodi

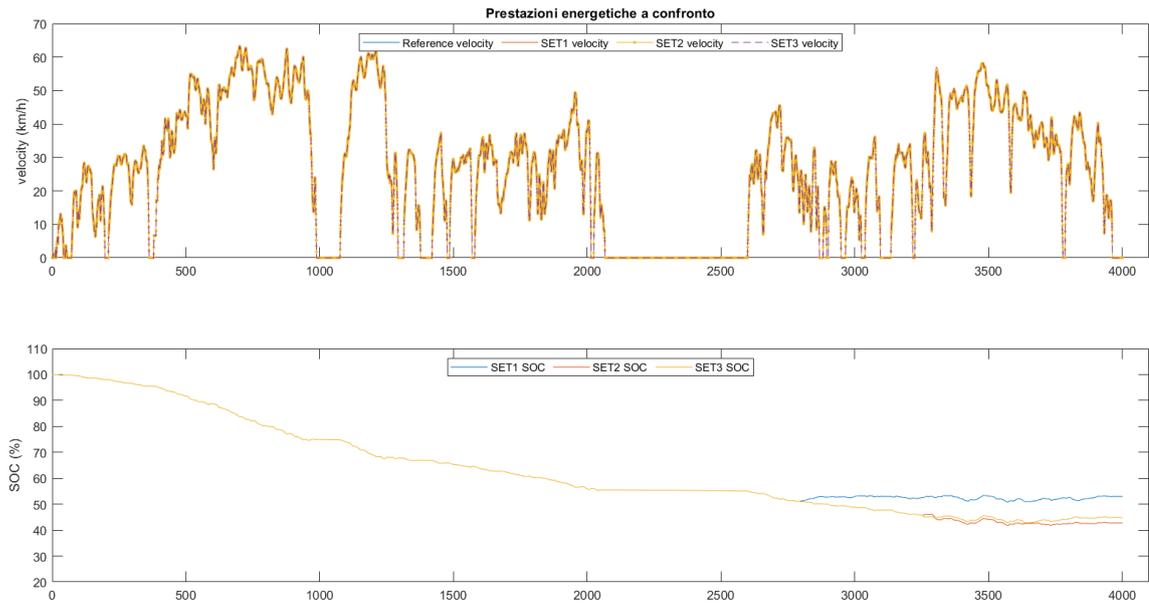


Figura 78: velocità veicolo simulata e Stato di carica della batteria considerando i tre set di parametri

I grafici presenti in Figura 78 dimostrano che i parametri di calibrazione non influiscono sulla capacità del veicolo di seguire il profilo di velocità imposto, almeno nella misura in cui non venga richiesta una potenza superiore ai limiti della batteria, dipendente dallo stato di carica. La funzione che simula il comportamento del driver è ben calibrata, così come è adeguato allo scopo il dimensionamento dei fornitori di potenza meccanica, almeno per la tratta considerata. Dalla figura è anche evidente anche il passaggio dalla modalità Charge Depleting alla modalità Charge Sustaining. Per i primi 2800 secondi di simulazione lo stato di carica della batteria è identico a prescindere dal set di parametri di calibrazione. Fino a questo punto, infatti, il SOC è superiore al maggiore dei SOC_{trgt} dei tre set ed il controllo comanda solo la macchina elettrica come fornitore di potenza. Superati i 2800 secondi il controllo, basandosi sui valori dei parametri del SET1, considera necessaria l'attivazione della modalità Charge Sustaining. Utilizzando i parametri di calibrazione del SET2 e del SET3, l'attivazione della modalità Charge Sustaining avviene superati i 3250 secondi di simulazione, a causa anche del valore inferiore dei SOC_{trgt} (45% e 43% rispettivamente). La Figura 79 mostra l'andamento della coppia meccanica erogata dalla macchina elettrica e dal motore termico durante l'esecuzione della tratta considerata, così come la modalità operativa imposta, al variare del SET di parametri utilizzato.

PARTE II

Materiali e Metodi

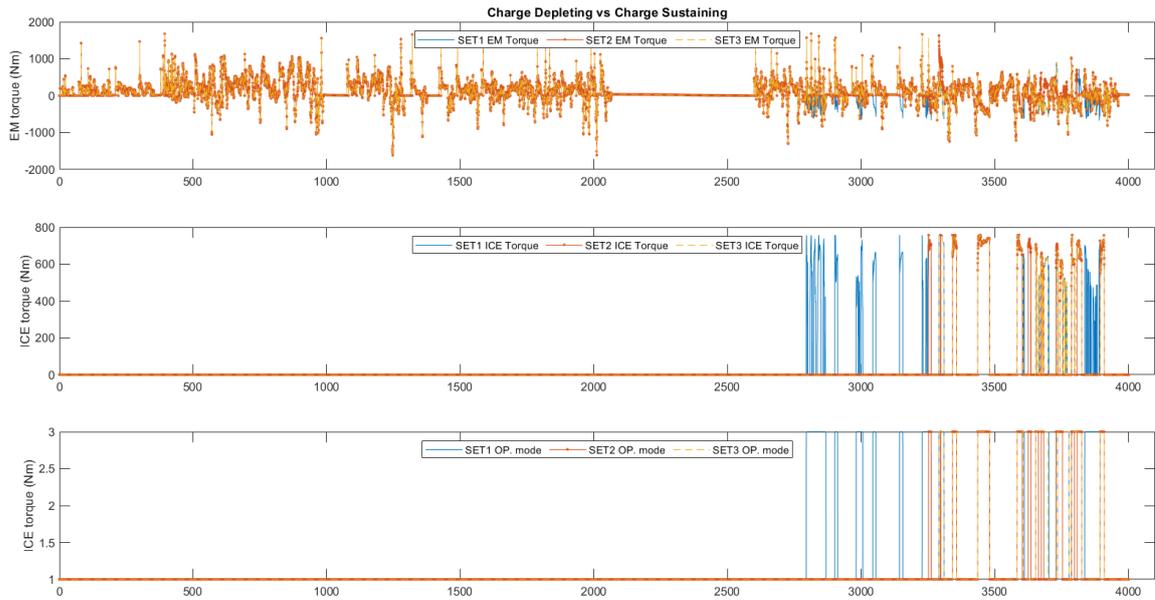


Figura 79: Coppia meccanica erogata dalla macchina elettrica e dal motore termico durante l'esecuzione della tratta.

Dall'evoluzione temporale della coppia della macchina elettrica si nota come, per SOC superiori al 95 %, il controllo non permetta la frenata rigenerativa; tutta la coppia frenante è demandata all'impianto meccanico. Al diminuire dello stato di carica aumenta la possibilità di rigenerazione, massima per SOC inferiori al 90%. Si nota anche la richiesta di passaggio dalla modalità Charge Depleting (Op. mode = 1) alla modalità Charge Sustaining (Op. mode = 3) con relativa accensione e comando di coppia al motore termico.

Se la tratta considerata fosse perfettamente ripetibile ogni volta che il veicolo offre il suo servizio lungo la linea 24, sarebbe immediato riconoscere i parametri di calibrazione che massimizzano la sua efficienza energetica. La tratta analizzata rappresenta un evento difficilmente ripetibile durante il servizio della linea 24. Fissata la linea di servizio, numerosi fattori esterni possono incidere sia sulla forma del profilo di velocità (orario, livello di traffico, condizioni atmosferiche) che sulla coppia richiesta ai motori (segnali di carico provenienti dall'autista, numero di passeggeri a bordo). Per questo motivo sono stati acquisiti i profili di velocità, così come il numero di passeggeri, su ulteriori tre tratte della stessa linea. Acquisiti i dati di input, sono state condotte delle analisi di ottimizzazione dei parametri che coinvolgono non solo la singola tratta, bensì la totalità delle quattro, secondo le metodologie già affrontate per i cicli di guida standardizzati.

PARTE II

Materiali e Metodi

La Figura 80 mostra il profilo di velocità delle quattro tratte considerate, così come l'evoluzione del profilo dei passeggeri.

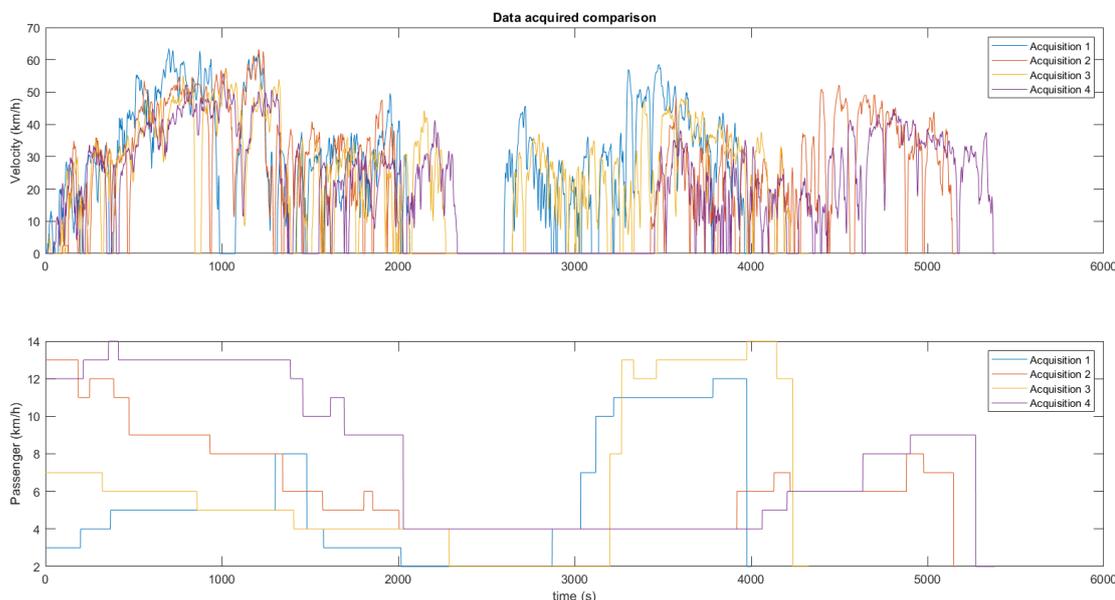


Figura 80: confronto profili di velocità e passeggeri acquisiti sulla linea 24

Nonostante i profili mostrati in Figura 80 facciano riferimento alla stessa linea di servizio, è chiara una notevole variazione sia tra il numero di passeggeri che tra i profili di velocità. In funzione dell'orario e del giorno della settimana (feriale o festivo), la tratta può essere più o meno usufruita dal cittadino. Nel caso delle acquisizioni 2 e 4, inoltre, la durata della tratta è aumentata perché è stata servita dal trasporto una fermata (Università-Papardo) non servita nel caso delle acquisizioni 1 e 3, comportando un aumento della distanza percorsa di circa mille metri. La Tabella 49 mostra le caratteristiche cinetiche dei quattro profili di velocità acquisiti.

Tabella 49: caratteristiche cinetiche dei profili di velocità acquisiti durante la percorrenza dalla linea 24.

Linea 24	Acquisizione 1	Acquisizione 2	Acquisizione 3	Acquisizione 4
Tempo (s)	4001	5160	4326	5385
Distanza (km)	28.68	29.73	28.79	29.92
Velocità Max (km/h)	62	63.1	57.2	55.8
Velocità Media (km/h)	25.81	20.74	23.95	20.00
Velocità Media guidata (km/h)	33.46	31.95	30.14	28.03
Numero di stop/km	0.7	1	1.1	0.9

Vista la differenza tra i profili di velocità e di passeggeri a bordo, è necessario condurre ulteriori analisi per verificare se, e quanto, il set di parametri che ottimizzano l'acquisizione 1 (SET3) sia

PARTE II

Materiali e Metodi

differente dal set di parametri che ottimizza l'efficienza energetica del veicolo considerando tutte le acquisizioni. Per tale motivo è stata condotta un'analisi di ottimizzazione del tutto analoga a quella svolta per individuare il set di parametri che ottimizza l'efficienza energetica dell'unità di potenza considerando tutti i cicli di guida standardizzati. In questo caso, chiaramente, le variabili di incertezza per l'ottimizzatore sono i profili di velocità ed i profili del numero dei passeggeri acquisiti durante lo svolgimento delle quattro tratte. Il set di parametri ottimi (SET 4) così come l'efficienza media del veicolo in termini di consumo equivalente e degrado della cella sono riportati in Tabella 50.

Tabella 50: parametri di ottimizzazione ed efficienza media considerando le quattro acquisizioni.

linea 24 - tot	SOC _{trgt} (%)	Chrg _{fctr} gain (-)	Act _{pwr} (kW)	η_{chrg} (-)	Avg fuel (km/l)	Qc (Ah)
SET 4	41.00	1.17	207.50	0.78	8.36	2.499981857

I risultati in Tabella 50 confermano le assunzioni già discusse per i casi precedenti. I parametri che ottimizzano la linea 24 prendendo in considerazione i possibili scenari in cui il veicolo può incorrere sono differenti rispetto al set di parametri che ottimizzano il singolo scenario. Utilizzando il SET 4 l'efficienza energetica del veicolo si abbassa rispetto all'utilizzo del SET3, ma rimane comunque superiore rispetto ai risultati ottenuti utilizzando il SET1 ed il SET2. Rispetto alla condizione di ottimo, utilizzando il SET4 l'efficienza in termini di consumo di combustibile equivalente medio si è ridotta di circa 0.21%, comunque una riduzione inferiore rispetto all'utilizzo del SET2 (2.00%) e del SET1 (10.68%). La Tabella 51 confronta i risultati ottenuti utilizzando i 4 set di parametri sull'acquisizione 1, considerando la perdita di autonomia che il chilometraggio percorribile fino al raggiungimento del fine vita della batteria.

Tabella 51: Confronto della variazione dell'efficienza energetica del veicolo considerando l'utilizzo di diversi set di parametri

	Avg fuel (km/l)	Avg fuel err (%)	Km ad EOL	Km ad EOL err(%)
SET 3	8.38	0.00	801389.82	0.00
SET 4	8.36	-0.21	788182.77	-1.65
SET 2	8.21	-2.00	683654.44	-14.69
SET 1	7.48	-10.68	781548.89	-2.48

4.3. Comunicazione Veicolo Città

Il problema dell'inquinamento ambientale dovuto al trasporto su strada è sempre più preoccupante e presente in un numero crescente di città, italiane e non. I danni causati dall'emissione di agenti inquinanti coinvolgono l'uomo direttamente ed indirettamente. Per danni diretti si intendono tutte le patologie legate alla presenza nell'organismo di agenti inquinanti, come monossido di carbonio e particolato. Per danni indiretti si intendono tutte le conseguenze dovute all'aumento di gas serra e di agenti inquinanti che causano i fenomeni di cambiamento globale che incidono sulla vita dell'uomo. Oltre le normative antinquinamento emanate a livello nazionale ed internazionale, anche i singoli centri urbani hanno adottato delle misure per limitare gli effetti nocivi dovuti all'inquinamento. Non è rara, infatti, l'istituzione di Zone a Traffico Limitato all'interno delle città, ossia zone delle città all'interno delle quali è necessario attenersi alle limitazioni del traffico durante alcune specifiche fasce orarie. Le limitazioni possono riguardare tutti i veicoli o soltanto alcune classi di veicoli che non rientrano nel peso, nella data di omologazione o nella classe di emissioni prevista dall'apposito regolamento. In generale sarebbe opportuno evitare di immettere agenti inquinanti in aree urbane altamente popolate, come all'interno dei centri storici, o in zone soggette frequentemente ad ingorghi stradali dovuti al traffico. Tra i vantaggi offerti da un veicolo ibrido c'è quello di poter virtualmente adattare la sua propulsione ad esigenze interne (Charge Depleting o Charge Sustaining), ma anche esterne. Immaginando che il veicolo debba attraversare zone con un'alta densità di popolazione, o a traffico limitato, è possibile dotare il sistema di controllo di un comando di attivazione della modalità Charge Depleting, affidando la trazione solamente alla macchina elettrica e comandando lo spegnimento del motore a combustione interna. In questo caso verrebbe meno l'emissione di agenti inquinanti nell'area soggetta a restrizioni, rispettando le normative a beneficio della popolazione presente nell'area circostante. Analizzando la linea 24 e la morfologia della città, è possibile notare che circa due terzi della distanza totale della linea è percorsa in zone della città altamente popolate, si attraversano cioè strade urbane e primarie (contrassegnate in verde in Figura 81) il restante terzo della linea considera la percorrenza di strade secondarie ed extraurbane (contrassegnate in arancione in Figura 81).

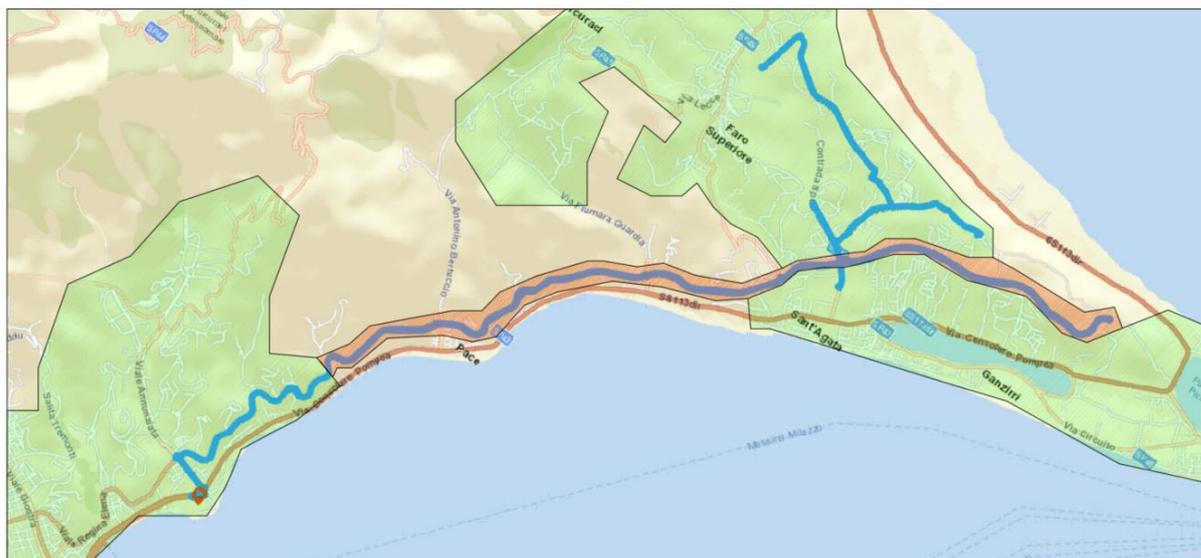


Figura 81: Aree urbane con alta densità di popolazione (verde) e con bassa densità di popolazione (arancione)

Nell’ottica di ridurre il quantitativo di agenti inquinanti in zone prossime ai centri urbani, sono state eseguite delle simulazioni per la valutazione delle prestazioni del veicolo con l’imposizione della modalità Charge Depleting da parte di un controllore esterno. Immaginando uno scenario di comunicazione tra veicolo e città, al sistema di controllo è stato aggiunto un parametro di input dipendente dalla posizione del veicolo, identificato come “Full Electric Command (FEC)”. A prescindere dal valore di C_{son}, che regola il passaggio dalla modalità Charge Depleting alla modalità Charge Sustaining, se il sistema di controllo riceve come informazione “FEC = true” verrà attivata la modalità Charge Depleting e la trazione verrà affidata solo alla macchina elettrica. In questa modalità il motore termico è forzato allo spegnimento e non si ha consumo di combustibile né emissione di agenti inquinanti.

L’analisi è stata condotta considerando il SET 4 come parametri di calibrazione, supponendo che il veicolo percorra consecutivamente le quattro tratte acquisite ed imponendo FEC pari a 1 (*true*) nei punti delle tratte che coinvolgono la percorrenza di strade urbane e primarie. Nei tratti di funzionamento in cui è presente il comando di attivazione della modalità full electric non è possibile effettuare alcuna correzione di coppia al fine di raggiungere il SOC_{trgt}. Per tale motivo è necessario ammettere che la batteria raggiunga un valore di SOC molto inferiore al SOC_{trgt}, ma non così inferiore da danneggiare la batteria stessa. Le considerazioni fatte sul degrado della batteria hanno portato alla definizione di un SOC limite inferiore pari a 25%. Se la batteria raggiungerà il valore di SOC critico, verrà terminata la simulazione. La Figura 82 riporta

PARTE II

Materiali e Metodi

l'andamento della velocità del veicolo, l'evoluzione dello stato di carica oltre che la modalità operativa ed il comando dell'attivazione della modalità full electric.

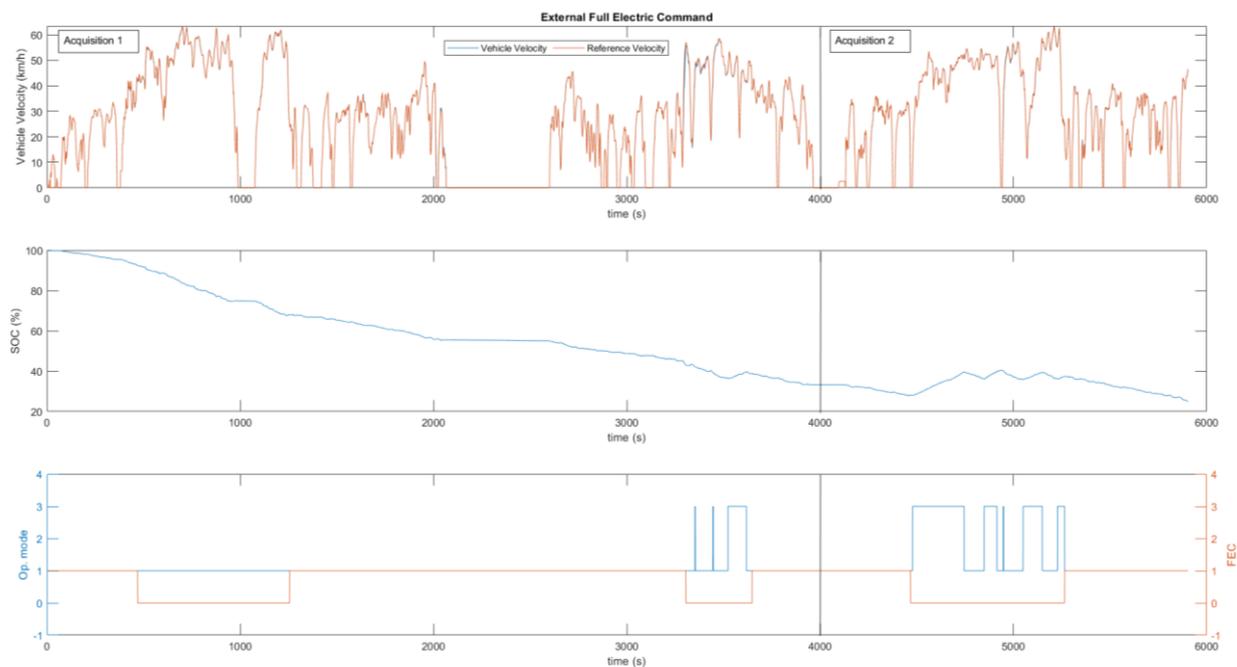


Figura 82: Variazione dello stato di carica della batteria e tratte percorse con imposizione del FEC.

Dalla Figura 82 emerge che quando è richiesta l'attivazione della modalità Full electric il modo operativo è pari ad 1 (modalità Charge Depleting), quando FEC è pari a zero (false) la modalità operativa è gestita dal sistema di controllo tramite il parametro CS_{on} . Nonostante il comando esterno, il veicolo ha percorso la prima tratta della linea 24 (sia andata che ritorno) senza raggiungere valori critici del SOC. La possibilità di percorrere la tratta in condizioni di sicurezza della batteria è però legata allo stato iniziale di carica. L'alto valore di stato di carica iniziale ha infatti permesso al veicolo di disporre di un'energia sufficiente a percorrere le zone "a consumo nullo" senza raggiungere livelli di SOC critici per la batteria, terminando il ciclo con uno stato di carica prossimo al 33%. Trovandosi i capolinea della linea 24 in zone soggette a limitazione (il valore di FEC è pari ad uno), non è possibile disporre del motore termico per la ricarica delle batterie. Ciò comporta che lo stato di carica iniziale per l'esecuzione della tratta due della stessa linea non sia sufficiente a mantenere livelli non critici per la batteria nelle zone con limitazione di emissioni. Dopo aver percorso una distanza di circa 8.5 km (37.15 km considerando anche la tratta 1) lo stato di carica della batteria ha raggiunto in simulazione un valore inferiore al 25%,

PARTE II

Materiali e Metodi

terminando quindi virtualmente la corsa. La simulazione non si sarebbe arrestata se la batteria avesse avuto, all'inizio di ogni porzione di percorso che prevede l'attivazione della modalità full electric imposta dall'esterno, uno stato di carica tale da permettere l'attraversamento della porzione di strada garantendo un valore di stato di carica finale superiore al valore critico.

La soluzione proposta in questo studio prevede:

- 1) Il calcolo della stima del dispendio energetico chilometrico delle tratte con restrizioni;
- 2) La preventiva conoscenza della distanza da percorrere in modalità full electric;
- 3) Il calcolo del valore minimo di stato di carica iniziale che la batteria deve possedere all'inizio di ogni tratta da percorrere in modalità full electric.

4.3.1. Dispendio Energetico Chilometrico.

Il calcolo del dispendio energetico chilometrico è avvenuto eseguendo quattro simulazioni, una per ogni profilo di velocità acquisito, in cui l'unico fornitore di potenza meccanica per la trazione è la macchina elettrica. La scelta di imporre la macchina elettrica come unico fornitore di potenza ha permesso di valutare l'influenza chilometrica sullo stato di carica della frenata rigenerativa, dell'efficienza della trasmissione e della macchina elettrica. Integrando l'evoluzione temporale della potenza elettrica, erogata o assorbita dal pacco batteria, e normalizzandola in funzione del chilometraggio percorso, è possibile stimare la quantità di energia media necessaria per percorrere la distanza di un chilometro per ogni singola tratta acquisita. Mediando i valori ottenuti per le singole acquisizioni si ottiene un valore rappresentativo della linea. Maggiore è il numero delle tratte acquisite, più il valore medio sarà rappresentativo della linea. La Tabella 52 contiene le informazioni circa il dispendio energetico chilometrico medio di ogni singola acquisizione, così come il riferimento per la linea 24.

Tabella 52: consumo energetico riferito alla singola tratta e consumo energetico medio

Tratta Considerata	Consumo Energetico al chilometro (Wh/km)
1	1013.35
2	972.76
3	970.80
4	930.02
media	971.73

Nota la linea da percorrere, l'orario di partenza e nota la posizione istantanea del veicolo, è possibile conoscere sia la distanza che il veicolo ha già percorso e quella da percorrere in

PARTE II

Materiali e Metodi

modalità full electric, così come la distanza percorsa o da percorrere in condizioni di funzionamento standard.

Il calcolo dello stato di carica necessario alla batteria per permettere l'attraversamento delle tratte con restrizione viene effettuato a partire della distanza da percorrere con restrizioni e dal consumo energetico chilometrico stimato, tramite l'equazione (4.1)

$$SOC_{tgtFEC} = \frac{d_{FEC} \cdot Avg_{Wh}}{\frac{km}{V_n \cdot Q_c \cdot N_p \cdot N_s \cdot \frac{\eta_{FE}}{100}}} + SOC_{min} + \Delta SOC \quad (4.1)$$

In cui d_{FEC} è la distanza da percorre in modalità full electric imposta dall'esterno, $Avg_{Wh/km}$ è il consumo energetico chilometrico medio della batteria quando la trazione è affidata solo alla macchina elettrica, SOC_{min} è il valore critico di stato di carica della batteria e ΔSOC è la differenza tra il SOC_{tgt} ed il SOC minimo medio sperimentato dalla batteria durante il funzionamento in modalità Charge Sustaining. I valori al numeratore rappresentano invece il valore di tensione nominale di cella (V_n , misurata in V), la capacità istantanea della cella (Q_c , misurata in Ah), il numero di celle in serie (N_s), il numero di paralleli (N_p) ed un fattore di sicurezza che tenga conto di perdite di efficienza della batteria (η_{FE}), posto pari a 0.95. L'equazione (4.1) prevede la conoscenza preventiva del consumo energetico medio del veicolo durante la percorrenza di una tratta stradale. Per il calcolo di questo parametro si è fatto riferimento ad acquisizioni sperimentali riferite ad una specifica linea, ma non sempre è possibile disporre delle acquisizioni o del percorso stradale del veicolo. Una possibile soluzione a questa mancanza di informazioni è riportata nell'Allegato A.2.

Noto il valore di SOC_{tgtFEC} è possibile valutarne la differenza con il SOC_{tgt} definito dal set di calibrazioni presente nel sistema ed imporre il massimo tra i due. Nelle tratte in cui il comando di attivazione della modalità full electric non è attivo, SOC_{tgtFEC} verrà calcolato tramite la (4.1), quando il comando di attivazione della modalità full electric è attivo, invece, SOC_{tgtFEC} è posto pari al valore nullo. In ogni caso, imponendo la modalità full electric dall'esterno, l'influenza sulla trazione del SOC_{tgt} viene trascurata. La Figura 83 mostra l'evoluzione della velocità del veicolo nella percorrenza delle quattro acquisizioni, svolte in maniera consecutiva. La figura riporta anche la variazione temporale dello stato di carica della batteria, del SOC_{tgt} , del comando di attivazione della modalità full electric ed il modo operativo.

PARTE II

Materiali e Metodi

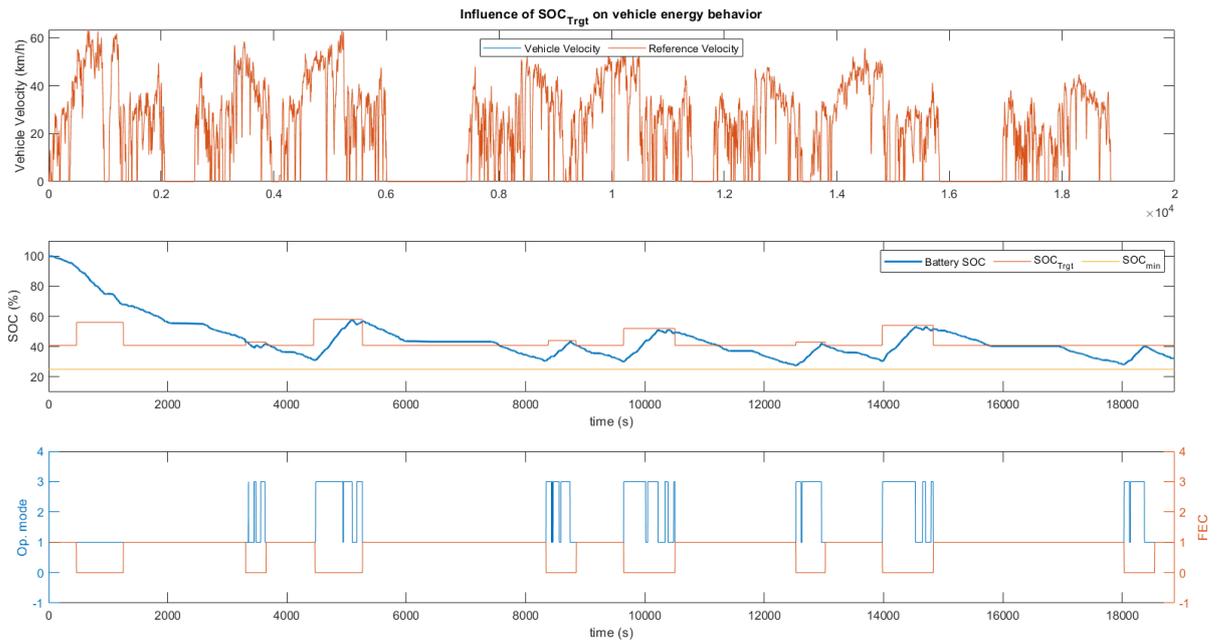


Figura 83: Percorrenza delle quattro tratte, in modo consecutivo, con adeguamento del SOC_{trgt}

Rispetto alla condizione precedente, in cui il SOC_{trgt} era definito unicamente dai parametri di calibrazione, è evidente una chiara variazione di funzionamento del veicolo. Lo stato di carica della batteria non raggiunge il valore critico e la batteria dimostra avere uno stato di carica sempre sufficiente a percorrere le tratte in modalità full electric. In Figura 84 è evidente la variazione del SOC_{trgt} nel caso in cui venga adeguato in funzione delle richieste esterne (Caso 2) rispetto al caso in cui non è presente alcun adeguamento (Caso 1). L'adeguamento del SOC_{trgt} avviene solo nelle zone in cui la sua variazione ha un'effettiva influenza sul funzionamento del veicolo, cioè quando il comando full electric non è attivo. In questa versione di controllo, il SOC_{trgt} assume un valore costante per tutta la percorrenza della sezione in modalità standard, futuri studi potrebbero condurre alla conclusione che questo tipo di adeguamento non sia ottimale. La Tabella 53 confronta l'efficienza energetica del veicolo, in termini di consumo e degrado della batteria, quando le quattro tratte consecutive sono percorse non considerando i vincoli esterni e quando invece i vincoli sono considerati.

PARTE II

Materiali e Metodi

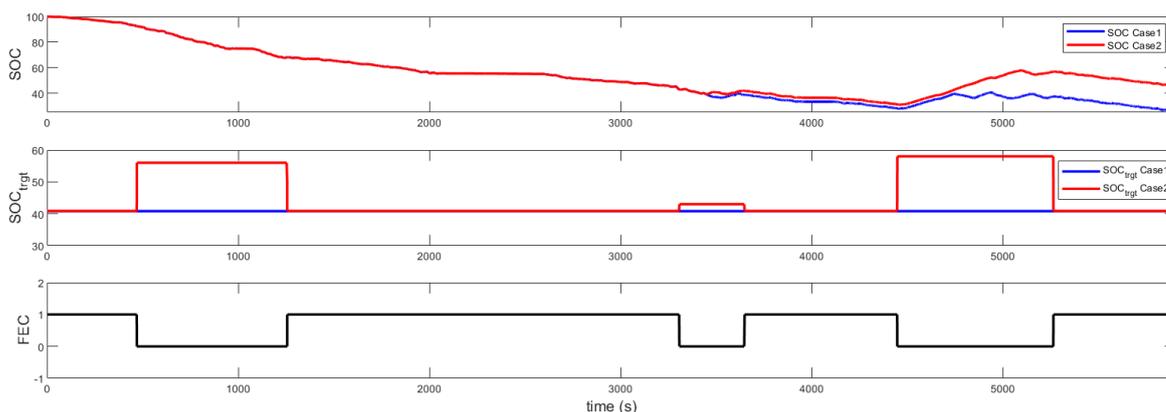


Figura 84: Confronto prestazioni del veicolo con e senza adeguamento del SOCtrgt

Tabella 53: confronto efficienza del veicolo considerando e non considerando la comunicazione veicolo città

Acquisizioni1-4	Avg fuel (km/l)	Avg fuel err (%)	Km ad EOL	Km ad EOL err (%)
Case 1	6.30	0.00	558833.20	0.00
Case 2	6.50	3.07	580352.69	-3.71

Dai valori riportati in Tabella 53 si evince come il consumo di combustibile equivalente al chilometro sia rimasto praticamente invariato, anzi è possibile notare un leggero decremento dovuto al maggior uso della batteria; proprio per lo stesso motivo, però, è aumentato anche il degrado della batteria. A fronte di una riduzione del consumo medio equivalente di circa il 3%, si ha una riduzione dei chilometri percorsi fino al raggiungimento della capacità di fine vita di 3.71% . Queste considerazioni conducono ad affermare che:

- 1) È necessario indagare se è possibile definire un'evoluzione del SOCtrgt che ottimizzi l'efficienza energetica del veicolo quando è attiva la modalità di adeguamento in funzione della posizione del veicolo;
- 2) È necessario indagare se gli svantaggi, in termini ambientali ed economici, dovuti alla variazione di funzionamento del motore a combustione interna e del maggior degrado della batteria siano inferiori rispetto al vantaggio di limitare il consumo di combustibile all'interno di centri urbani.

CONCLUSIONI

Dal sesto rapporto di valutazione redatto dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), emerge che è necessaria un'immediata inversione di rotta nell'utilizzo energetico odierno e nei processi che coinvolgono l'emissione di agenti inquinanti in atmosfera, per permettere all'ecosistema di mantenere l'aumento della temperatura media globale entro il grado e mezzo. La principale causa dell'aumento della temperatura media globale, e degli effetti ad essa associata, è da ricercarsi nella sempre più elevata concentrazione di gas serra in atmosfera, che assorbono e trattengono una grossa porzione dei raggi infrarossi emessi dalla superficie terrestre. La Ricerca e le Istituzioni devono cooperare per offrire delle soluzioni che limitino l'emissione in atmosfera di agenti inquinanti nel brevissimo termine, agendo su tutti i settori industriali, per contrastare il riscaldamento globale ed evitare che i suoi effetti diventino irreversibili. Secondo il rapporto dell'Agenzia Europea dell'ambiente, il settore dei trasporti è responsabile di circa un quarto delle emissioni totali di CO₂ in Europa, il 71,7% delle quali viene dal trasporto stradale. Nonostante gli sforzi attuati dalle regolamentazioni, negli ultimi tre decenni l'unico settore a vedere un aumento delle emissioni di gas serra è stato quello dei trasporti, con un aumento del 33.5% tra il 1990 ed il 2019.

Da quanto appena discusso è chiaro che il settore del trasporto su strada sia parte attiva nell'emissione di agenti inquinanti in atmosfera e passibile di un netto efficientamento energetico, se le istituzioni incentivassero l'utilizzo di un trasporto ecosostenibile e la ricerca offrisse soluzioni innovative dal punto di vista tecnologico. In questo scenario si inquadra lo studio proposto, che si è posto l'obiettivo di analizzare l'efficienza energetica di un mezzo per il trasporto pubblico per proporre delle soluzioni innovative all'emissione in atmosfera di agenti inquinanti che siano implementabili nel breve termine. Lo studio nasce infatti con l'obiettivo di sviluppare l'algoritmo di gestione dell'unità di potenza di un autobus con propulsione ibrida che sia in grado di minimizzare l'uso di combustibile ed il degrado degli accumulatori elettrochimici. Il Sistema di controllo sviluppato, sfruttando la previsione del dispendio energetico, si pone l'obiettivo di limitare l'emissione di agenti inquinanti in zone specifiche della città riuscendo comunque a compiere la missione assegnata.

Nella prima parte dello studio è stato presentato lo stato dell'arte delle propulsioni ibride termiche\elettriche, evidenziando il ruolo della macchina elettrica all'interno dell'unità di potenza. Sono state presentate e discusse le metodologie di progettazione delle propulsioni ibride, analizzando i modelli e le equazioni matematiche che descrivono il comportamento

meccanico ed energetico dei componenti che le equipaggiano. Particolare attenzione è stata riposta alla modellazione delle dinamiche di funzionamento e degrado degli accumulatori elettrochimici, evidenziando le differenze che esistono tra gli accumulatori a base di Piombo, Nichel e Litio.

Nella seconda parte dello studio è stata analizzata la propulsione dell'autobus Orion VII della Orion BUS Industries, resa ibrida rispetto alla propulsione di serie dall' Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Il modello matematico della propulsione è stato sviluppato sulla base delle equazioni descritte nella prima parte dello studio ed i risultati delle simulazioni sono stati confrontati con i dati acquisiti sperimentalmente dall'ORNL. Definita l'accuratezza dei modelli simulativi, è stata confrontata l'influenza della tecnologia dell'accumulatore elettrochimico e della macchina elettrica sull'efficienza complessiva del sistema. Lo studio ha evidenziato che:

- a. la scelta della tecnologia dell'accumulatore elettrochimico deve essere effettuata considerando non solo le prestazioni a breve termine, ma anche e soprattutto quelle a lungo termine. Nello studio condotto, gli accumulatori a base di nichel sono risultati più performanti in termini di distanza percorsa a parità di Stato di Carica, ma decisamente inadeguati ad equipaggiare il veicolo in relazione all'utilizzo prolungato. Gli accumulatori a base di Litio, altresì, permettono un notevole risparmio economico ed energetico rispetto alle altre tecnologie data la loro capacità di essere meno soggette al degrado dovuto ad applicazione di carichi ciclici.
- b. La scelta della macchina elettrica adeguata può comportare un aumento del 10% di distanza percorsa a parità di stato di carica. Confrontando la macchina elettrica prodotta da Dana con quella prodotta da JingJing, è emerso che la distribuzione della mappa di efficienza della macchina elettrica all'interno della sua curva caratteristica può comportare un notevole beneficio in termini energetici. Si conclude quindi che la macchina elettrica deve essere scelta non solo in funzione della sua tecnologia costruttiva o potenza meccanica, ma soprattutto in relazione alla distribuzione della sua mappa di efficienza e, se presente, all'influenza del cambio meccanico e della strategia di cambiata.

Definita la componentistica meccanica, è stata analizzata la metodologia di progettazione del sistema di controllo della propulsione. La progettazione e lo sviluppo del sistema di controllo ha seguito l'approccio Model-Based Design, che comprende la definizione dei requisiti base di funzionamento dell'Energy Management System, la loro implementazione, la codifica in codice di programmazione e tre fasi di test: MIL, SIL ed HIL.

Conclusioni

I parametri di calibrazione del sistema di controllo, di tipo Rule-Based, sono stati ottimizzati tramite l'algoritmo di ottimizzazione "Pattern Search" al fine di individuare il set in grado di minimizzare il consumo equivalente di combustibile e i fenomeni di degrado della batteria. I processi di ottimizzazione hanno fatto riferimento alla percorrenza virtuale di cicli di guida standardizzati, rappresentativi del trasporto pubblico secondo i centri di ricerca da cui prendono il nome. Dalla procedura di ottimizzazione è emerso che:

- a. In un sistema di controllo Rule-Based multi-mode, come quello sviluppato, è necessario l'utilizzo di un algoritmo di ottimizzazione per la definizione dei parametri che minimizzino il consumo di combustibile equivalente e che, contestualmente, massimizzino le performance energetiche delle celle elettrochimiche. La variabilità delle condizioni operative e l'interdipendenza dei parametri rendono estremamente difficile definire il set ottimo senza l'ausilio di un algoritmo di ottimizzazione.
- b. Non è emersa una corrispondenza univoca tra parametri cinetici del profilo di velocità e parametri di controllo ottimi, almeno non tra quelli analizzati. Poiché è pratica comune riferirsi ad un ciclo di guida standardizzato per la valutazione per le performance energetiche, risulta evidente che questo tipo di approccio può portare a conclusioni o a definizione di parametri di calibrazione errati. In mancanza di informazioni circa la storia di carico a cui è destinato il veicolo durante il suo normale funzionamento, sarebbe più opportuno considerare più cicli di guida standardizzati (nello studio sette) piuttosto che riferirsi al singolo ciclo di guida.

Definiti i parametri di calibrazione del sistema di controllo, alla modellazione dello stesso è seguita la fase di generazione automatica del codice e le fasi di test. La fase di test MIL è stata svolta per testare che la matematica del controllo rispettasse i requisiti di progettazione. La fase di test SIL è stata svolta per testare che il codice generato del controllo rispettasse i requisiti di progettazione. La fase di test HIL è stata svolta per verificare che il codice di controllo, implementato in un hardware fisico, e le interfacce di comunicazione rispettassero i requisiti. Per il test HIL è stato sviluppato, grazie alle competenze e l'ausilio di Pure Power Control S.r.l., un banco di test comprendente:

- 1) Un'unità di controllo elettronico (ECU) in grado di elaborare il codice C dell'EMS;
- 2) Un Controllore Logico Programmabile (PLC) in grado di elaborare la matematica che simula il comportamento del veicolo;

Conclusioni

- 3) Un joystick utilizzato per simulare le azioni dell'autista sul pedale acceleratore, freno e selettore PRND;
- 4) Le interfacce di comunicazione tra i vari moduli, basate su CAN bus con protocollo di comunicazione standard SAEJ1939\CANopen.

Verificate le risposte del codice implementato in centralina agli input del Joystick ed ai segnali di feedback provenienti dal modello del veicolo, è stato possibile concludere che:

- a. L'approccio Model-Based Design ha permesso di sviluppare un sistema di controllo per veicolo con propulsione ibrida dalla definizione dei requisiti fino all'implementazione in centralina in tempi estremamente ridotti, congruentemente all'ipotesi di urgenza imposta dal repentino cambiamento globale;
- b. L'EMS sviluppato può essere testato su un veicolo di produzione, congruentemente all'ipotesi di attuabilità posta nelle fasi iniziali dello studio

Terminate le fasi di test è stato condotto un caso studio sulla linea 24 del servizio di trasporto pubblico della città di Messina. Il caso studio si pone l'obiettivo di valutare le performance energetiche del veicolo in relazione:

- 1) Alla percorrenza di profili di velocità non standard ma plausibili, essendo questi acquisiti sperimentalmente. Oltre il profilo di velocità è stato acquisito anche il profilo del numero di passeggeri a bordo del veicolo durante l'esecuzione della tratta.
- 2) All'imposizione di determinati modi operativi da parte di un supervisore esterno, per esigenze legate all'attraversamento di zone a traffico limitato o con un'elevata densità di popolazione.

Le simulazioni sono state condotte considerando il set di parametri che ottimizza il ciclo di guida standardizzato (SORT3) con caratteristiche cinetiche più prossime a quelle della linea 24, considerando il set di parametri che ottimizza i sette cicli di guida standardizzati presentati nello studio e considerando il set di parametri che ottimizza la percorrenza della linea 24. I risultati confermano le assunzioni fatte precedentemente. Il set di parametri che ottimizza l'efficienza energetica del veicolo considerando i sette cicli di guida standardizzati è più simile al set che ottimizza l'efficienza energetica del veicolo durante la percorrenza della linea 24. Questi risultati confermano che il singolo ciclo di guida standardizzato non sia sufficiente a rappresentare, in maniera esaustiva, le condizioni operative reali di un veicolo.

Conclusioni

In riferimento all'imposizione di determinate modalità di funzionamento da parte di un controllore esterno, le simulazioni condotte hanno dimostrato che il veicolo non è in grado di rispettare i vincoli imposti, a meno di un adeguamento del sistema di controllo alle nuove regole. La soluzione proposta in questo studio ha coinvolto la previsione del dispendio energetico chilometrico medio del veicolo per ovviare al raggiungimento di condizioni di funzionamento critiche per la batteria. Il calcolo del dispendio energetico proposto si basa sulla conoscenza della posizione e sul numero dei passeggeri a bordo del veicolo, oltre che della distanza da percorrere in condizioni di limitazione. A partire da queste informazioni, facilmente reperibili dai fornitori del servizio, è possibile adattare il sistema di controllo (tramite la variazione del parametro SOC_{trgt}) per permettere al veicolo di rispettare i vincoli imposti. La soluzione è stata proposta con l'obiettivo di essere facilmente implementabile in centraline fisiche in quanto comporta un aumento del costo computazionale minimo e si basa su segnali già disponibili per la maggior parte dei fornitori del servizio di trasporto pubblico. La soluzione proposta assume un maggior spessore industriale considerando che può essere implementata per ogni linea del servizio di trasporto pubblico. Tramite una semplice interfaccia, l'operatore può indicare al sistema di controllo la linea servita permettendogli di adattare i parametri di gestione energetica (considerando gli ottimi per la linea) o variare il SOC_{trgt} per permettere l'attraversamento delle zone a limitazione di funzionamento.

Oggetto di studi futuri sarà l'ottimizzazione della gestione della variazione del SOC_{trgt} in relazione alle limitazioni di funzionamento imposte dalla comunicazione Vehicle to City (V2C), integrazione delle informazioni di dispositivi satellitari (vedi Allegato A.2) ed approfondimento della gestione termica ed energetica degli accumulatori elettrochimici.

ALLEGATO A.1

Struttura funzioni di lettura e scrittura messaggi su CAN bus del PLC

```
void Rx Data fun(UDINT ID, USINT DataAdr[ ])
```

```
{  
CAN.CANread.can id = ID;  
DataAdr[0] = CAN.readData[0];  
DataAdr[1] = CAN.readData[1];  
DataAdr[2] = CAN.readData[2];  
DataAdr[3] = CAN.readData[3];  
DataAdr[4] = CAN.readData[4];  
DataAdr[5] = CAN.readData[5];  
DataAdr[6] = CAN.readData[6];  
DataAdr[7] = CAN.readData[7];  
CANread(&CAN.CANread);  
}
```

```
void Tx Data fun(UDINT ID, USINT DataAdr[ ])
```

```
{  
CAN.CANread.can id = ID;  
CANread(&CAN.CANread);  
CAN.writeData[0] = DataAdr[0];  
CAN.writeData[1] = DataAdr[1];  
CAN.writeData[2] = DataAdr[2];  
CAN.writeData[3] = DataAdr[3];  
CAN.writeData[4] = DataAdr[4];  
CAN.writeData[5] = DataAdr[5];  
CAN.writeData[6] = DataAdr[6];  
CAN.writeData[7] = DataAdr[7];  
CAN.CANwrite.enable = 1;  
CAN.CANwrite.us ident = CAN.CANopen.us ident;  
CAN.CANwrite.can id = ID;  
CAN.CANwrite.data adr = (UDINT)CAN.writeData;  
CAN.CANwrite.data lng = sizeof(CAN.writeData)  
CANwrite(&CAN.CANwrite);  
}
```

Pacchetto di messaggi inviato dal veicolo “*feedback_motor_torque*”, contenente i segnali di coppia di feedback del motore elettrico e del motore termico, come esempio per rappresentare la tecnica del bit-shifting.

```
Motor trq fdbk [0] = ICE_MotorShaft_Trq_Nm;  
Motor trq fdbk [1] = (ICE_MotorShaft_Trq_Nm)/256;  
Motor trq fdbk [2] = EM_MotorShaft_Trq_Nm;  
Motor trq fdbk [3] = (EM_MotorShaft_Trq_Nm)/256;  
Motor trq fdbk [4] = 0 ;  
Motor trq fdbk [5] = 0;  
Motor trq fdbk [6] = 0;  
Motor trq fdbk [7] = 0;
```

ALLEGATO A.2

Il presente studio ha l'obiettivo di indagare la possibilità di prevedere il profilo di velocità, e quindi la quantità di energia consumata, di un veicolo impegnato a percorrere una tratta urbana. Lo scopo dello studio è di ottenere il risultato utilizzando un numero limitato di parametri e sensori per ottenere una previsione sempre disponibile, facilmente implementabile in un hardware fisico ed economicamente vantaggiosa. Lo studio parte da due presupposti:

- l'utilizzo di software GPS (come Google Maps) è di uso comune sia per la popolazione sia tra i dispositivi in dotazione ai veicoli di ultima generazione. Definito il punto di partenza e di destinazione, i software GPS riescono fornire informazioni circa il miglior percorso da seguire, la sua altitudine sull'intensità del traffico urbano che caratterizza il percorso. Generalmente queste informazioni sono disponibili all'utente tramite mappe di colori e grafici di facile intuizione.
- il Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles (WLTC) rappresenta, ad oggi, il ciclo di guida standardizzato più rappresentativo della guida urbana, extraurbana ed autostradale a livello internazionale, viste le procedure utilizzate nella sua definizione. I profili di velocità utilizzati per definirlo sono stati infatti acquisiti considerando lo stile di guida di conducenti di tutto il mondo e guidati in diverse condizioni di traffico.

A partire dalle due assunzioni appena descritte, l'obiettivo dello studio è stato quello di correlare il ciclo di guida standardizzato con i livelli di traffico mostrati a mappa da Google Maps. La correlazione potrebbe permettere di stimare il dispendio energetico legato ad ogni percorso da affrontare: conoscendo la distanza da percorrere in una determinata condizione di traffico e conoscendo il profilo di velocità associato ad ogni tratto del percorso, è possibile stimare la potenza necessaria alla percorrenza dell'intera tratta e, conseguentemente, l'energia richiesta.

Il primo passo è stato quello di percorrere delle porzioni di strade urbane sul territorio della città di Messina, registrando le informazioni sul traffico e il profilo di velocità tramite l'utilizzo rispettivamente di Google Maps (GM) e Trackaddict. Per effettuare la campagna di raccolta dati è stato necessario solo uno smartphone compatibile con le due applicazioni.

Eseguita la campagna di acquisizione, i profili di velocità sono stati raccolti in tre database, uno per ogni condizione di traffico sperimentata durante la guida: alta intensità di traffico (tratte

rosse in GM), media intensità di traffico (tratte gialle in GM) e bassa intensità di traffico (tratte verdi in GM). I profili di velocità sono stati acquisiti durante la percorrenza di strade urbane all'interno della città di Messina, per questo motivo la correlazione è avvenuta considerando solo la tratta urbana del WLTC. La metodologia può comunque essere estesa anche alle altre sezioni del WLTC, se i profili di velocità acquisiti rispettano le categorie di guida del WLTC. Per poter eseguire la correlazione tra profili di guida acquisiti e ciclo di guida standardizzato, è stato necessario filtrare i dataset sperimentali seguendo la stessa procedura utilizzata per la creazione del ciclo standard.

La procedura consiste nel suddividere i cicli di guida in periodi di Standstill e Short Trips (ST). Con Per Standstill si indicano le porzioni del ciclo di guida in cui la velocità è pari a zero. Gli Short Trips sono le porzioni contenute tra due Standstill e in cui la velocità è diversa da zero. Gli ST sono stati sottoposti alle stesse operazioni di filtraggio che hanno caratterizzato il WLTC, ossia:

1. Eliminazione degli short trips con una durata inferiore a dieci secondi;
2. Eliminazione degli short trips con velocità massima inferiore a 1 m/s.
3. Eliminazione degli short trips con accelerazione superiore a 4 m/s^2 e inferiore a $-4,5 \text{ m/s}^2$.

Il processo di filtraggio ha portato alla creazione di 65 Short Trip, suddivisi nei tre database come segue:

- Il database “bassa intensità di traffico” ingloba 22 ST.
- Il database “media intensità di traffico” ingloba 25 ST
- Il database “alta intensità di traffico” ingloba 18 ST.

Il database contenente i periodi Standstill non è stato ulteriormente indagato nello studio. Il presente studio mira a creare un profilo di velocità associato ad un percorso stradale a partire dalle informazioni fornite da Google Maps, che il sistema di controllo elettronico di un HEV possa utilizzare per prevedere il consumo di energia e adattare le strategie di controllo. Poiché gli HEV sono dotati di sistemi Start&Stop, il consumo di energia durante i periodi di inattività è pari a zero.

Per ogni Short Trips appartenente a ciascun database, sono state calcolate le seguenti quantità:

1. Durata.
2. Distanza percorsa.
3. Velocità massima.
4. Media aritmetica della velocità.
5. Media ponderata sulla distanza della velocità.
6. Media ponderata sulla distanza dell'accelerazione positiva.
7. Media ponderata sulla distanza dell'accelerazione negativa.
8. Accelerazione positiva relativa (RPA).

Gli stessi otto parametri sono stati valutati anche per i cinque short trips che costituiscono la sezione low del WLTC. Utilizzando il metodo della two step analysis cluster sono stati creati tre cluster, uno per ogni database, a partire dagli otto parametri calcolati. Considerando le stesse grandezze, gli ST del WLTC sono stati confrontati con i cluster per assegnare ad ognuno di essi la classe più appropriata (o livello di traffico) considerando la distanza euclidea più breve dal centroide di ogni cluster.

Il metodo proposto ha assegnato il primo e il terzo ST del WLTC il livello di traffico medio, al secondo ST il livello di traffico basso ed al quarto e quinto il livello di traffico alto. I risultati della correlazione, così come il workflow della metodologia descritta, sono presentati in Figura.

Avendo assegnato ad ogni livello di traffico un profilo di velocità è possibile stimare l'energia richiesta al veicolo per affrontare un determinato percorso. Definita la tratta, Google Maps mostrerà la distribuzione del traffico lungo il percorso. Essendo associato ad ogni livello di traffico un profilo di velocità, è possibile assegnare all'intera tratta un profilo di velocità ipotetico, quindi l'energia spesa dal veicolo.

Per testare l'efficacia della metodologia di previsione, sono state condotte delle simulazioni numeriche confrontando il dispendio energetico di un veicolo impegnato a percorrere i profili di velocità acquisiti sperimentalmente ed i profili assegnati al livello di traffico sperimentato durante la percorrenza delle tratte urbane. I 65 ST presentati precedentemente sono stati rielaborati per replicare le informazioni di GM e le condizioni di guida reali. Tramite la funzione "rand" di MatLab, i 65 ST sono stati riorganizzati in maniera casuale ed in gruppi di dieci. La riorganizzazione ha portato alla creazione di sei cicli di guida composti da 10 Short Trips e di un ciclo di guida composto da 5. Infine, tutti gli ST, organizzati secondo un livello di traffico crescente (da basso ad alto), hanno formato l'ottavo ciclo di guida. Per gli otto cicli di guida

ottenuti, la distanza percorsa e la distribuzione del livello di traffico sono note in ogni istante di tempo; le stesse informazioni sono reperibili durante l'utilizzo di Google Maps. La conoscenza della distanza da percorrere in diverse condizioni di traffico ha permesso di costruire il ciclo di guida da utilizzare per la previsione del carburante e dell'energia. È stato sufficiente ripetere gli Short Trips del WLTC, rispettando lo stato di traffico assegnato, fino a coprire la stessa distanza mostrata da Google Maps.

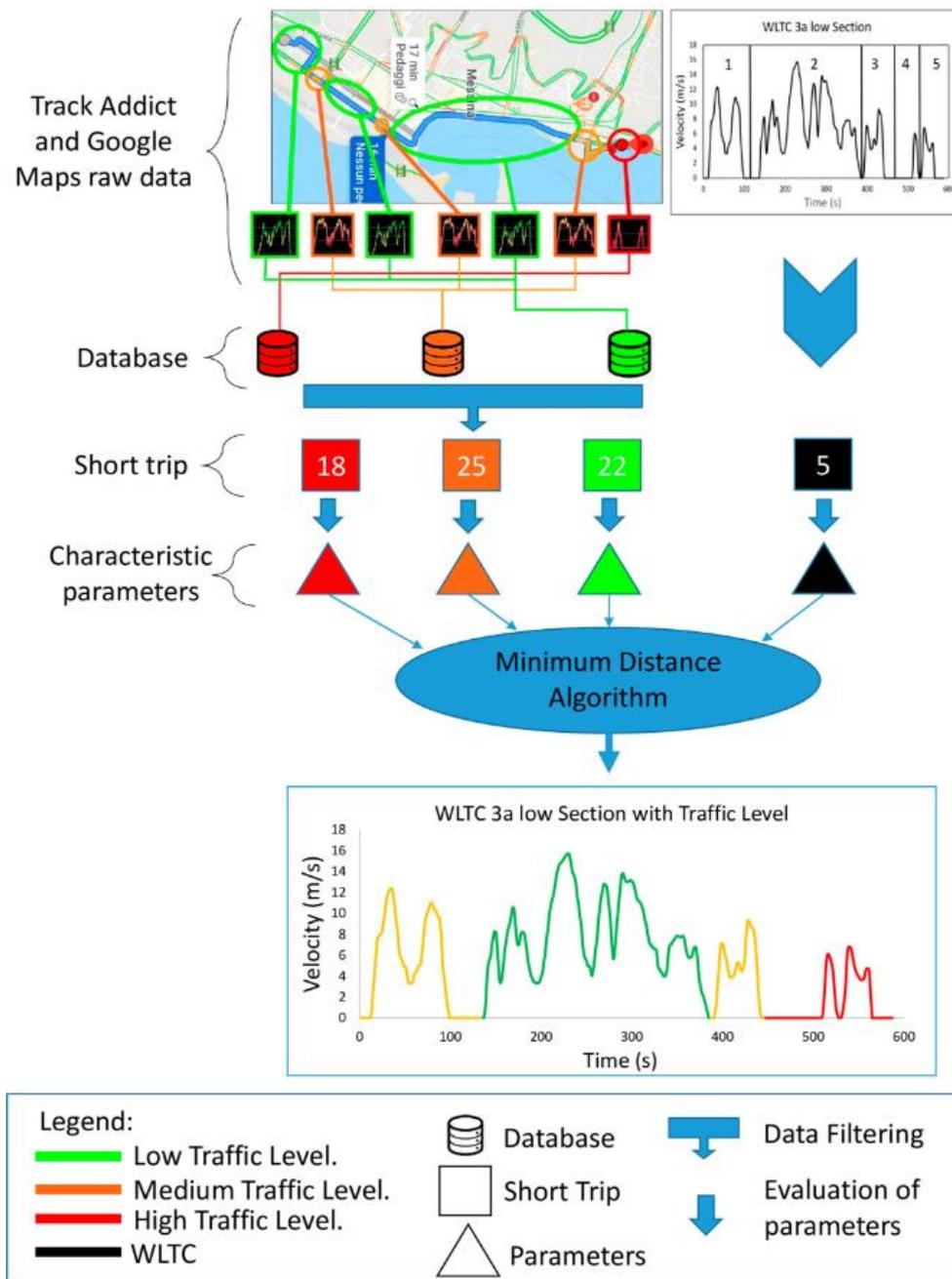


Figura A 1: Rappresentazione schematica della procedura di classificazione

Disponendo degli otto cicli di guida reali e degli otto cicli costruiti, è stato possibile valutare il dispendio energetico reale e previsto. Sono state condotte delle simulazioni in cui il driver simulato ha eseguito gli otto cicli sperimentali, valutando il valore di riferimento per il dispendio energetico. Nelle successive simulazioni, il conducente ha eseguito i profili di guida ottenuti dalla ripetizione degli ST del WLTC, associati ai corrispettivi livelli di traffico, che hanno permesso di valutare il valore del dispendio energetico previsto. La Tabella mostra i risultati delle simulazioni. La prima colonna contiene il numero di riferimento del ciclo di guida (da uno a otto), la seconda colonna contiene la distribuzione del livello di traffico per ogni ciclo, la terza colonna mostra la distanza percorsa e la quarta la differenza percentuale tra consumo energetico valutato considerando i cicli reali e quello previsto.

Tabella A 1: cicli di guida simulati, distribuzione intensità di traffico, distanza percorsa e errore percentuale tra dispendio energetico reale e previsto

DC Number	Short Trips and Traffic State	Distance (m)	Energy tot. Per. Error (%)
1		7387	9.27
2		4317	8.75
3		9313	8.93
4		1704	1.44
5		4077	10.39
6		4018	10.33
7		3241	-3.00
8 (TOT)		32057	-2.36

I risultati suggeriscono che nei percorsi in cui prevale la distanza percorsa a bassi livelli di traffico, la metodologia proposta tende a sottostimare i valori reali (cicli 7 e 8). Nei cicli in cui prevalgono le distanze percorse ad alta intensità di traffico, la metodologia tende a sovrastimare il valore dell'energia. L'errore nella valutazione del dispendio energetico rimane comunque entro livelli accettabili e la metodologia risulta estremamente efficace considerando che:

- Come dati di input sono necessarie solo le informazioni di GM; non è strettamente necessario alcun altro dispositivo o software. Questo aspetto rende la metodologia estremamente economica.
- L'algoritmo che regola i livelli di traffico mostrati dal GM è unico e valido in tutti i centri urbani. Questo aspetto rende la metodologia universale.
- Il WLTC considera gli stili di guida dei conducenti di tutto il mondo, in modo che la metodologia possa essere estesa a qualsiasi automobilista.

- L'accuratezza della previsione può aumentare considerando altre informazioni di input, come la distribuzione dei semafori o lo stile tipico del conducente.

Questa metodologia, quindi, può essere utilizzata per la previsione del dispendio energetico quando nessun'altra informazione è disponibile per il veicolo. La previsione del dispendio energetico può essere utilizzata, negli HEV, per:

- Gestire la riserva di energia per consentire la trazione completamente elettrica nelle Zone a Traffico Limitato (ZTL) o la minimizzazione dell'inquinamento atmosferico locale.
- Aumentare il ciclo di vita delle riserve di energia (solitamente le batterie) riducendo i costi di manutenzione e i problemi di smaltimento.
- Ottimizzare l'efficienza dell'uso del motopropulsore riducendo il consumo di carburante e le emissioni inquinanti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “Summary for Policymakers”, doi: 10.1017/9781009157896.001.
- [2] UNFCCC, “Paris Climate Change Conference,” 2015.
- [3] UNFCCC, “Paris Climate Change Conference,” in *Environment*, Dec. 2015.
- [4] R. K. Pachauri, A. Reisinger, L. Bernstein, Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, and Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate change 2007 : synthesis report*.
- [5] G. Guest, F. Cherubini, and A. H. Strømman, “Global Warming Potential of Carbon Dioxide Emissions from Biomass Stored in the Anthroposphere and Used for Bioenergy at End of Life,” *J Ind Ecol*, vol. 17, no. 1, pp. 20–30, 2013, doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x.
- [6] A. Mikhaylov, N. Moiseev, K. Aleshin, and T. Burkhardt, “Global climate change and greenhouse effect,” *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, vol. 7, no. 4, pp. 2897–2913, Jun. 2020, doi: 10.9770/jesi.2020.7.4(21).
- [7] Council of the European Union, “setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles,” *Official Journal of the European Union*, vol. 111, pp. 13–53.
- [8] Agencia Europea de Medio Ambiente., *Transport and environment report 2021 : decarbonising road transport : the role of vehicles, fuels and transport demand*. Publications Office of the European Union, 2022.
- [9] J. Fang, T. Fujiyama, and H. Wong, “Modelling passenger distribution on metro platforms based on passengers’ choices for boarding cars,” *Transportation Planning and Technology*, vol. 42, no. 5, pp. 442–458, Jul. 2019, doi: 10.1080/03081060.2019.1609218.
- [10] S. H. Jacobson and D. M. King, “Fuel saving and ridesharing in the US: Motivations, limitations, and opportunities,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 14, no. 1, pp. 14–21, 2009, doi: 10.1016/j.trd.2008.10.001.

Bibliografia

- [11] V. T. Minh, R. Moezzi, J. Cyrus, and J. Hlava, “Optimal Fuel Consumption Modelling, Simulation, and Analysis for Hybrid Electric Vehicles,” *Applied System Innovation*, vol. 5, no. 2, Apr. 2022, doi: 10.3390/asi5020036.
- [12] O. Dingel, J. Ross, I. Trivic, N. Cavina, and M. Rioli, “Model-based assessment of hybrid powertrain solutions,” in *SAE Technical Papers*, 2011. doi: 10.4271/2011-24-0070.
- [13] C. C. Chan, “The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 4, pp. 704–718, 2007, doi: 10.1109/JPROC.2007.892489.
- [14] Y. Lee, C. Kim, and J. Shin, “A hybrid electric vehicle market penetration model to identify the best policy mix: A consumer ownership cycle approach,” *Appl Energy*, vol. 184, pp. 438–449, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.038.
- [15] M. Ehsani, K. V. Singh, H. O. Bansal, and R. T. Mehrjardi, “State of the Art and Trends in Electric and Hybrid Electric Vehicles,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 967–984, Jun. 2021, doi: 10.1109/JPROC.2021.3072788.
- [16] P. Zhang, F. Yan, and C. Du, “A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48. Elsevier Ltd, pp. 88–104, Aug. 01, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.03.093.
- [17] M. Kim, D. Jung, and K. Min, “Hybrid thermostat strategy for enhancing fuel economy of series hybrid intracity bus,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 63, no. 8, pp. 3569–3579, Oct. 2014, doi: 10.1109/TVT.2013.2290700.
- [18] E. Wang, M. Ouyang, F. Zhang, and C. Zhao, “Performance Evaluation and Control Strategy Comparison of Supercapacitors for a Hybrid Electric Vehicle,” in *Science, Technology and Advanced Application of Supercapacitors*, IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.80948.
- [19] Z. Zhao, Z. Yu, M. Yin, and Y. Zhu, “Torque distribution strategy for single driveshaft parallel hybrid electric vehicle,” in *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings*, 2009, pp. 1350–1353. doi: 10.1109/IVS.2009.5164481.

- [20] C. Yang, M. Zha, W. Wang, K. Liu, and C. Xiang, “Efficient energy management strategy for hybrid electric vehicles/plug-in hybrid electric vehicles: Review and recent advances under intelligent transportation system,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 14, no. 7. Institution of Engineering and Technology, pp. 702–711, Jul. 01, 2020. doi: 10.1049/iet-its.2019.0606.
- [21] K. Song *et al.*, “Multi-mode energy management strategy for fuel cell electric vehicles based on driving pattern identification using learning vector quantization neural network algorithm,” *J Power Sources*, vol. 389, pp. 230–239, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.04.024.
- [22] D. Rajput, J. M. Herreros, M. S. Innocente, J. Schaub, and A. M. Dizqah, “Electrified Powertrain with Multiple Planetary Gears and Corresponding Energy Management Strategy,” *Vehicles*, vol. 3, no. 3, pp. 341–356, Jul. 2021, doi: 10.3390/vehicles3030021.
- [23] H. Liu, C. Wang, X. Zhao, and C. Guo, “An adaptive-equivalent consumption minimum strategy for an extended-range electric bus based on target driving cycle generation,” *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 7, 2018, doi: 10.3390/en11071805.
- [24] T. M. Vu, R. Moezzi, J. Cyrus, J. Hlava, and M. Petru, “Parallel hybrid electric vehicle modelling and model predictive control,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 22, Nov. 2021, doi: 10.3390/app112210668.
- [25] P. Qiang, P. Wu, T. Pan, and H. Zang, “Real-time approximate equivalent consumption minimization strategy based on the single-shaft parallel hybrid powertrain,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 23, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14237919.
- [26] W. Pérez, P. Tulpule, S. Midlam-Mohler, and G. Rizzoni, “Data-Driven Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Hybrid Electric and Connected Vehicles,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/app12052705.
- [27] D. Pei and M. J. Leamy, “Dynamic programming-informed equivalent cost minimization control strategies for hybrid-electric vehicles,” *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, vol. 135, no. 5, 2013, doi: 10.1115/1.4024788.

- [28] F. Vidal-Naquet and G. Zito, “Adapted optimal energy management strategy for drivability,” in *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2012*, 2012, pp. 358–363. doi: 10.1109/VPPC.2012.6422678.
- [29] S. Inuzuka, B. Zhang, and T. Shen, “Real-time hev energy management strategy considering road congestion based on deep reinforcement learning,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 17, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14175270.
- [30] J. Meng, G. Luo, M. Ricco, M. Swierczynski, D. I. Stroe, and R. Teodorescu, “Overview of Lithium-Ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 5. MDPI AG, Apr. 25, 2018. doi: 10.3390/app8050659.
- [31] N. Campagna *et al.*, “Battery models for battery powered applications: A comparative study,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 15, Aug. 2020, doi: 10.3390/en13164085.
- [32] F. Cignini *et al.*, “Experimental data comparison of an electric minibus equipped with different energy storage systems,” *Batteries*, vol. 6, no. 2, Jun. 2020, doi: 10.3390/batteries6020026.
- [33] T. M. Padovani, M. Debert, G. Colin, and Y. Chamaillard, “Optimal energy management strategy including battery health through thermal management for hybrid vehicles,” in *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2013, vol. 7, no. PART 1, pp. 384–389. doi: 10.3182/20130904-4-JP-2042.00137.
- [34] L. Tang and G. Rizzoni, “Energy management strategy including battery life optimization for a HEV with a CVT,” in *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2016*, Jul. 2016, pp. 549–554. doi: 10.1109/ITEC-AP.2016.7513014.
- [35] S. Atalay, M. Sheikh, A. Mariani, Y. Merla, E. Bower, and W. D. Widanage, “Theory of battery ageing in a lithium-ion battery: Capacity fade, nonlinear ageing and lifetime prediction,” *J Power Sources*, vol. 478, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.229026.
- [36] G. dos Reis, C. Strange, M. Yadav, and S. Li, “Lithium-ion battery data and where to find it,” *Energy and AI*, vol. 5. Elsevier B.V., Sep. 01, 2021. doi: 10.1016/j.egyai.2021.100081.

Bibliografia

- [37] X. Tang, K. Liu, K. Li, W. D. Widanage, E. Kendrick, and F. Gao, “Recovering large-scale battery aging dataset with machine learning,” *Patterns*, vol. 2, no. 8, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.patter.2021.100302.
- [38] O. Dingel, J. Ross, I. Trivic, N. Cavina, and M. Rioli, “Model-based assessment of hybrid powertrain solutions,” in *SAE Technical Papers*, 2011. doi: 10.4271/2011-24-0070.
- [39] A. T. Zaremba, C. Soto, and M. Jennings, “Methodology for assessment of alternative hybrid electric vehicle powertrain system architectures,” in *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2012, vol. 1, no. 1, pp. 240–248. doi: 10.4271/2012-01-1010.
- [40] T. J. Boehme *et al.*, “Optimal design strategies for different hybrid powertrain configurations assessed with European drive cycles,” in *SAE Technical Papers*, 2013, vol. 2. doi: 10.4271/2013-01-1751.
- [41] M. Huang *et al.*, “Research on hybrid ratio of fuel cell hybrid vehicle based on ADVISOR,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 36, pp. 16282–16286, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.130.
- [42] H. L. Husted, “A Comparative Study of the Production Applications of Hybrid Electric Powertrains,” Jun. 2003. doi: 10.4271/2003-01-2307.
- [43] K. T. Chau and Y. S. Wong, “Overview of power management in hybrid electric vehicles,” *Energy Convers Manag*, vol. 43, no. 15, pp. 1953–1968, Oct. 2002, doi: 10.1016/S0196-8904(01)00148-0.
- [44] A. Dhand *et al.*, “Stop-start micro hybrid: An estimation of automatic engine stop duration in real world usage,” in *SAE Technical Papers*, 2009. doi: 10.4271/2009-01-1336.
- [45] A. Kishor Asekar, *Stop-Start System Using Micro-Hybrid Technology For Increasing Fuel Efficiency Proceedings of 7 th STOP-START SYSTEM USING MICRO-HYBRID TECHNOLOGY FOR INCREASING FUEL EFFICIENCY.*
- [46] A. Dhand, B. Cho, A. Walker, D. Kok, M. Burgess, and B. Semar, “Optimization potential of the vehicle launch performance for start-stop micro-hybrid vehicles,” in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Aug. 2010, vol. 224, no. 8, pp. 1059–1070. doi: 10.1243/09544070JAUTO1496.

Bibliografia

- [47] M. Awadallah, P. Tawadros, P. Walker, and N. Zhang, “Dynamic modelling and simulation of a manual transmission based mild hybrid vehicle,” *Mech Mach Theory*, vol. 112, pp. 218–239, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.02.011.
- [48] M. Awadallah, P. Tawadros, P. Walker, and N. Zhang, “Comparative fuel economy, cost and emissions analysis of a novel mild hybrid and conventional vehicles,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 232, no. 13. SAGE Publications Ltd, pp. 1846–1862, Nov. 01, 2018. doi: 10.1177/0954407017736116.
- [49] O. Sundström, L. Guzzella, and P. Soltic, “Torque-assist hybrid electric powertrain sizing: From optimal control towards a sizing law,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 4, pp. 837–849, Jul. 2010, doi: 10.1109/TCST.2009.2030173.
- [50] X. Zhang and C. Mi, *Vehicle Power Management*. London: Springer London, 2011. doi: 10.1007/978-0-85729-736-5.
- [51] H. K. Ng, J. A. Anderson, M. J. Duoba, and R. P. Larsen, “Engine Start Characteristics of Two Hybrid Electric Vehicles (HEVs)-Honda Insight and Toyota Prius,” 2001.
- [52] K. J. Kelly, M. Zolot, G. Glinsky, and A. Hieronymus, “Test Results and Modeling of the Honda Insight using ADVISOR: Preprint,” 2001. [Online]. Available: <http://www.ctts.nrel.gov/analysis/>
- [53] Y. Liu, Y. G. Liao, and M. C. Lai, “Fuel economy improvement and emission reduction of 48 V mild hybrid electric vehicles with P0, P1, and P2 architectures with lithium battery cell experimental data,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 10, 2021, doi: 10.1177/16878140211036022.
- [54] Vehicular Technology Society and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) : proceedings : 14-17 December 2017, Belfort, France*.
- [55] M.-K. Tran, M. Akinsanya, S. Panchal, R. Fraser, and M. Fowler, “Design of a Hybrid Electric Vehicle Powertrain for Performance Optimization Considering Various Powertrain Components and Configurations,” 2020, doi: 10.3390/vehicles.

Bibliografia

- [56] Y. Qiao, Y. Song, and K. Huang, “A novel control algorithm design for hybrid electric vehicles considering energy consumption and emission performance,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 14, 2019, doi: 10.3390/en12142698.
- [57] L. Guzzella, “Modeling and Control of Advanced Propulsion Systems. Oil & Gas Science and Technology-*Revue d’IFP Energies nouvelles*,” *Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP*, vol. 62, no. 4, pp. 585–594, 2007, doi: 10.2516/ogst:2007040i.
- [58] L. Guzzella and A. Amstutz, “CAE Tools for Quasi-Static Modeling and Optimization of Hybrid Powertrains,” 1999. [Online]. Available: <http://www.lms.ethz.ch/downloadQSSTB/>
- [59] G. Rizzoni, L. Guzzella, and B. M. Baumann, “Unified modeling of hybrid electric vehicle drivetrains,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 4, no. 3, pp. 246–257, 1999, doi: 10.1109/3516.789683.
- [60] D. Kok *et al.*, “Vehicle modeling for energy management strategies.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/255668962>
- [61] C.-C. Lin *et al.*, “Integrated, Feed-Forward Hybrid Electric Vehicle Simulation in SIMULINK and its Use for Power Management Studies,” 2001.
- [62] D. Assanis *et al.*, “Validation and Use of SIMULINK Integrated, High Fidelity, Engine-In-Vehicle Simulation of the International Class VI Truck,” 2000. [Online]. Available: <http://arc.engin.umich.edu>
- [63] L. Guzzella and C. H. Onder, *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2004. doi: 10.1007/978-3-662-08003-0.
- [64] M. Zabat, N. Stabile, S. Frascaroli, and F. Browand, “Drag Forces Experienced by 2, 3 and 4-Vehicle Platoons at Close Spacings,” 1995. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/44612279>
- [65] Rakesh Patidar, G. D. Gidwani, and P. Solanki, “Analysis of rolling resistance, wear resistance and wet grip index performance of tyre for safety purpose.” [Online]. Available: www.ijrdt.org

- [66] R. Patidar, G. D. Gidwani, P. Solanki, R. G. Nandera, and M. P.) India, "Investigation of " HD-HS Silica " Embraces Tyre Material and Analysis of Rolling Resistance and Wear Resistance Investigation of 'HD-HS Silica' Embraces Tyre Material and Analysis of Rolling Resistance and Wear Resistance Performance of Tyre," 2017. [Online]. Available: www.ijssrd.com
- [67] P. Fajri, R. Ahmadi, and M. Ferdowsi, "Equivalent vehicle rotational inertia used for electric vehicle test bench dynamic studies," in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2012, pp. 4115–4120. doi: 10.1109/IECON.2012.6389231.
- [68] L. Jeongwoo and D. J. Nelson, "Rotating inertia impact on propulsion and regenerative braking for electric motor driven vehicles," in *2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, 2005*, vol. 2005, pp. 308–314. doi: 10.1109/VPPC.2005.1554575.
- [69] E. R. Grijalva and J. M. López Martínez, "Analysis of the reduction of CO₂ emissions in urban environments by replacing conventional city buses by electric bus fleets: Spain case study," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 3, Feb. 2019, doi: 10.3390/en12030525.
- [70] A. Rashid, "Overview of disc brakes and related phenomena - A review," *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, vol. 10, no. 4. Inderscience Publishers, pp. 257–301, Nov. 01, 2014. doi: 10.1504/IJVNV.2014.065634.
- [71] R. Cavalcanti, G. Sandoni, and R. Zanasi, "Control Software Optimization for a Multi-Clutch System in a Hybrid All Wheel Drive Vehicle," in *The 17-th International Conference on Control System and Computer Science*.
- [72] M. Gadola, D. Chindamo, B. Lenzo, M. Gadola, and D. Chindamo, "Revisiting the mechanical limited-slip differential for high-performance and race car applications." [Online]. Available: <http://shura.shu.ac.uk/30090/>
- [73] C. J. Oglieve, M. Mohammadpour, and H. Rahnejat, "Optimisation of the vehicle transmission and the gear-shifting strategy for the minimum fuel consumption and the minimum nitrogen oxide emissions," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 231, no. 7, pp. 883–899, Jun. 2017, doi: 10.1177/0954407017702985.

Bibliografia

- [74] L. Guzzella and Antonio. Sciarretta, *Vehicle propulsion systems: introduction to modeling and optimization*. Springer, 2007.
- [75] A. Galvagno, U. Previti, F. Famoso, and S. Brusca, “An Innovative Methodology to Take into Account Traffic Information on WLTP Cycle for Hybrid Vehicles,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14061548.
- [76] “INTRODUCTION TO HYBRID VEHICLE SYSTEM MODELING AND CONTROL.”
- [77] X. Li and S. A. Evangelou, “Torque-Leveling Threshold-Changing Rule-Based Control for Parallel Hybrid Electric Vehicles,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 68, no. 7, pp. 6509–6523, Jul. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2916720.
- [78] “A Guide to Understanding Battery Specifications,” 2008.
- [79] S. Mukhopadhyay and F. Zhang, “A high-gain adaptive observer for detecting Li-ion battery terminal voltage collapse,” in *Automatica*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 896–902. doi: 10.1016/j.automatica.2013.12.011.
- [80] J.-M. Tarascon and M. Armand, “Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries,” 2001. [Online]. Available: www.nature.com
- [81] M. R. S. Chauhan, A. Sharma, and P. Ratiti Sharma, ““Battery Monitoring for State-of-Charge and Power optimization using LabVIEW.”” [Online]. Available: www.ijert.org
- [82] Reddy. Thomas, *Linden’s Handbook of Batteries*, 4th ed.
- [83] D. Berndt, “VRLA batteries, advances and limitations,” *J Power Sources*, vol. 154, no. 2, pp. 509–517, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.10.083.
- [84] B. Dietrich, *Maintenance-free Batteries*: 2003.
- [85] N. Shamim, V. v. Viswanathan, V. L. Sprenkle, E. C. Thomsen, G. Li, and D. M. Reed, “Valve Regulated Lead Acid Battery Evaluation under Peak Shaving and Frequency Regulation Duty Cycles,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 9, May 2022, doi: 10.3390/en15093389.

Bibliografia

- [86] Y. Nakayama, S. Takahashi, K. Hirakawa, and Y. Yamaguchi, “Development of a long life 35 Ah capacity VRLA battery for load-leveling applications,” *J Power Sources*, vol. 125, no. 1, pp. 135–140, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0378-7753(03)00828-0.
- [87] W. B. Gu, G. Q. Wang, and C. Y. Wang, “Modeling the overcharge process of VRLA batteries.”
- [88] D. M. Rice and J. E. Manders, “A review of soft-lead specifications in the light of the requirements of valve-regulated lead/acid batteries,” 1997.
- [89] J. Garche, P. T. Moseley, and E. Karden, “Lead–acid batteries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles,” in *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, Elsevier, 2015, pp. 75–101. doi: 10.1016/B978-1-78242-377-5.00005-4.
- [90] C. Jeyaseelan, A. Jain, P. Khurana, D. Kumar, and S. Thatai, “9 Ni-Cd Batteries,” 2020.
- [91] O. Velgosová, J. Kaduková, R. Marcinčáková, P. Palfy, and J. Trpčevská, “Influence of H₂SO₄ and ferric iron on Cd bioleaching from spent Ni-Cd batteries,” *Waste Management*, vol. 33, no. 2, pp. 456–461, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2012.10.007.
- [92] Y. Sato, K. Ito, T. Arakawa, and Kobayakawa K, “Possible Cause of the Memory Effect Observed in Nickel-Cadmium Secondary Batteries,” *Journal Electrochem. Soc.*, vol. 143, pp. 225–228, 1996.
- [93] David. Linden and T. B. Reddy, *Handbook of batteries*. McGraw-Hill, 2002.
- [94] J. Tarabay and N. Karami, “Nickel Metal Hydride battery: Structure, chemical reaction, and circuit model,” in *2015 3rd International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering, TAECE 2015*, May 2015, pp. 22–26. doi: 10.1109/TAECE.2015.7113594.
- [95] A. K. Shukla, S. Venugopalan, and B. Hariprakash, “Nickel-based rechargeable batteries.”
- [96] N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, and G. Yushin, “Li-ion battery materials: Present and future,” *Materials Today*, vol. 18, no. 5. Elsevier B.V., pp. 252–264, Jun. 01, 2015. doi: 10.1016/j.mattod.2014.10.040.

- [97] M. Broussely, P. Biensan, and B. Simon, "Lithium insertion into host materials: the key to success for Li ion batteries." [Online]. Available: www.elsevier.nl/locate/electacta
- [98] J. B. Goodenough and Y. Kim, "Challenges for rechargeable Li batteries," *Chemistry of Materials*, vol. 22, no. 3, pp. 587–603, Feb. 09, 2010. doi: 10.1021/cm901452z.
- [99] N. Omar *et al.*, "Lithium iron phosphate based battery - Assessment of the aging parameters and development of cycle life model," *Appl Energy*, vol. 113, pp. 1575–1585, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.09.003.
- [100] C. S. Chin, Z. Gao, and C. Z. Zhang, "Comprehensive electro-thermal model of 26650 lithium battery for discharge cycle under parametric and temperature variations," *J Energy Storage*, vol. 28, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101222.
- [101] J. B. Goodenough and Y. Kim, "Challenges for Rechargeable Li Batteries," *Chemistry of Materials*, vol. 22, no. 3, pp. 587–603, Feb. 2010, doi: 10.1021/cm901452z.
- [102] B. Kang and G. Ceder, "Battery materials for ultrafast charging and discharging," *Nature*, vol. 458, no. 7235, pp. 190–193, Mar. 2009, doi: 10.1038/nature07853.
- [103] Y. Tang, Y. Zhang, W. Li, B. Ma, and X. Chen, "Rational material design for ultrafast rechargeable lithium-ion batteries," *Chem Soc Rev*, vol. 44, no. 17, pp. 5926–5940, Sep. 2015, doi: 10.1039/c4cs00442f.
- [104] J. Vetter *et al.*, "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries," *J Power Sources*, vol. 147, no. 1–2, pp. 269–281, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006.
- [105] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, "A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications," *Journal of Power Sources*, vol. 241, pp. 680–689, 2013. doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.040.
- [106] J. Schmalstieg, S. Käbitz, M. Ecker, and D. U. Sauer, "A holistic aging model for Li(NiMnCo)O₂ based 18650 lithium-ion batteries," *J Power Sources*, vol. 257, pp. 325–334, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.02.012.

- [107] J. de Hoog *et al.*, “Combined cycling and calendar capacity fade modeling of a Nickel-Manganese-Cobalt Oxide Cell with real-life profile validation,” *Appl Energy*, vol. 200, pp. 47–61, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.018.
- [108] X. Han *et al.*, “A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle,” *eTransportation*, vol. 1. Elsevier B.V., Aug. 01, 2019. doi: 10.1016/j.etrans.2019.100005.
- [109] Y. Gao, J. Jiang, C. Zhang, W. Zhang, and Y. Jiang, “Aging mechanisms under different state-of-charge ranges and the multi-indicators system of state-of-health for lithium-ion battery with Li(NiMnCo)O₂ cathode,” *J Power Sources*, vol. 400, pp. 641–651, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.07.018.
- [110] E. Redondo-Iglesias, P. Venet, and S. Pelissier, “Modelling lithium-ion battery ageing in electric vehicle applications—calendar and cycling ageing combination effects,” *Batteries*, vol. 6, no. 1, Mar. 2020, doi: 10.3390/batteries6010014.
- [111] J. Meng, G. Luo, M. Ricco, M. Swierczynski, D. I. Stroe, and R. Teodorescu, “Overview of Lithium-Ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 5. MDPI AG, Apr. 25, 2018. doi: 10.3390/app8050659.
- [112] B. Wu and B. Chen, “Study the performance of battery models for hybrid electric vehicles,” in *MESA 2014 - 10th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Conference Proceedings*, Oct. 2014. doi: 10.1109/MESA.2014.6935559.
- [113] J. Du, Z. Liu, and Y. Wang, “State of charge estimation for Li-ion battery based on model from extreme learning machine,” *Control Eng Pract*, vol. 26, no. 1, pp. 11–19, May 2014, doi: 10.1016/j.conengprac.2013.12.014.
- [114] M. Charkhgard and M. Farrokhi, “State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using neural networks and EKF,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 4178–4187, Dec. 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2043035.

- [115] R. Xiong, J. Cao, Q. Yu, H. He, and F. Sun, “Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1832–1843, Dec. 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2780258.
- [116] M. R. Jongerden and B. R. Haverkort, “Which battery model to use?,” *IET Software*, vol. 3, no. 6, pp. 445–457, 2009, doi: 10.1049/iet-sen.2009.0001.
- [117] S. Li and B. Ke, “Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented approaches,” in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011. doi: 10.1109/PES.2011.6039230.
- [118] O. Tremblay and L.-A. Dessaint, “Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications.”
- [119] S. N. Motapon, A. Lupien-Bedard, L. A. Dessaint, H. Fortin-Blanchette, and K. Al-Haddad, “A Generic Electrothermal Li-ion Battery Model for Rapid Evaluation of Cell Temperature Temporal Evolution,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 998–1008, Feb. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2618363.
- [120] C. Galatsopoulos, S. Papadopoulou, C. Ziogou, D. Trigkas, and S. Voutetakis, “Optimal operation of a residential battery energy storage system in a time-of-use pricing environment,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 17, Sep. 2020, doi: 10.3390/app10175997.
- [121] R. Ahmed *et al.*, “Model-Based Parameter Identification of Healthy and Aged Li-ion Batteries for Electric Vehicle Applications,” *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, vol. 4, no. 2, pp. 233–247, Jul. 2015, doi: 10.4271/2015-01-0252.
- [122] Y. Yang, X. Hu, D. Qing, and F. Chen, “Arrhenius equation-based cell-health assessment: Application to thermal energy management design of a HEV NiMH battery pack,” *Energies (Basel)*, vol. 6, no. 5, pp. 2709–2725, 2013, doi: 10.3390/en6052709.
- [123] D. Burzyński, R. Pietracho, L. Kasprzyk, and A. Tomczewski, “Analysis and modeling of the wear-out process of a lithium-nickel-manganese-cobalt cell during cycling operation under constant load conditions,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 20, Oct. 2019, doi: 10.3390/en12203899.

- [124] J. Meng, G. Luo, M. Ricco, M. Swierczynski, D. I. Stroe, and R. Teodorescu, “Overview of Lithium-Ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 5. MDPI AG, Apr. 25, 2018. doi: 10.3390/app8050659.
- [125] S. N. Motapon, E. Lachance, L. A. Dessaint, and K. Al-Haddad, “A Generic cycle life model for lithium-ion batteries based on fatigue theory and equivalent cycle counting,” *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 1, pp. 207–217, 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.3015396.
- [126] I. Laresgoiti, S. Käbitz, M. Ecker, and D. U. Sauer, “Modeling mechanical degradation in lithium ion batteries during cycling: Solid electrolyte interphase fracture,” *J Power Sources*, vol. 300, pp. 112–122, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.09.033.
- [127] K. Smith, M. Earleywine, E. Wood, J. Neubauer, and A. Pesaran, “Comparison of plug-in hybrid electric vehicle battery life across geographies and drive cycles,” in *SAE Technical Papers*, 2012. doi: 10.4271/2012-01-0666.
- [128] M. Marazzi and J. Nocedal, “Wedge trust region methods for derivative free optimization,” *Mathematical Programming, Series B*, vol. 91, no. 2, pp. 289–305, Jan. 2002, doi: 10.1007/s101070100264.
- [129] A. R. Conn, K. Scheinberg, and P. L. Toint, “Recent progress in unconstrained nonlinear optimization without derivatives,” *Mathematical Programming, Series B*, vol. 79, no. 1–3, pp. 397–414, Oct. 1997, doi: 10.1007/BF02614326.
- [130] M. J. D. Powell, *UOBYQA: unconstrained optimization by quadratic approximation*, vol. 92. 2002.
- [131] V. Torczon and S. J. Optim, “ON THE CONVERGENCE OF PATTERN SEARCH ALGORITHMS *,” 1997. [Online]. Available: <http://www.siam.org/journals/ojsa.php>
- [132] C. Audet and J. E. Dennis, “Analysis of Generalized Pattern Searches,” *SIAM Journal on Optimization*, vol. 13, no. 3, pp. 889–903, Jan. 2002, doi: 10.1137/S1052623400378742.
- [133] “[https://www.enersys.com/en-gb/products/batteries/cyclon/cyclon/.](https://www.enersys.com/en-gb/products/batteries/cyclon/cyclon/)”

Bibliografia

- [134] “<https://na.industrial.panasonic.com/products/batteries/rechargeable-batteries/lineup/nickel-metal-hydride>.”
- [135] “<https://a123batteries.com/>.”

LISTA PUBBLICAZIONI

Previti, U.; Brusca, S.; Galvagno, A. *Passenger Car Energy Demand Assessment: a New Approach Based on Road Traffic Data*. **E3S Web of Conferences** **197**, 05006 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019705006>

Galvagno, A.; Previti, U.; Famoso, F.; Brusca, S. *An Innovative Methodology to Take into Account Traffic Information on WLTP Cycle for Hybrid Vehicles*. **Energies** **2021**, *14*, 1548. <https://doi.org/10.3390/en14061548>.

Previti, U.; Galvagno, A.; Risitano, G.; Alberti, F. *Smart Design: Application of an Automatic New Methodology for the Energy Assessment and Redesign of Hybrid Electric Vehicle Mechanical Components*. **Vehicles** **2022**, *4*, 586–607. <https://doi.org/10.3390/vehicles4020034>

Previti, U.; Brusca, S.; Galvagno, A.; Famoso, F. *Influence of the energy management system control strategies on the battery state of health in hybrid electric vehicles*. **Sustainability** **2022**, *14*(19), 12411; <https://doi.org/10.3390/su141912411>