



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi di architetture
ibride-elettriche per
piattaforme aeree autocarrate**

Relatori

prof. Aurelio Somà
dott. Francesco Mocera

Candidato

Italo Russo
matricola: 211109

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

*A mio nonno Italo e
a mia nonna Elisa*

Sommario

Gli argomenti trattati in questa tesi fanno riferimento all'utilizzo di architetture ibride su piattaforme autocarrate aeree, ovvero mezzi con la possibilità di circolare che montano uno o più bracci meccanici. Per introdurre alla tematica dell'ibrido elettrico vengono esaminate alcune delle possibili suddivisioni che è possibile riscontrare in letteratura. Si definiscono poi problematiche legate alla regolamentazione di zone a basse emissioni o a zero emissioni, sia a livello europeo, sia a livello nazionale, che pongono le basi per sostenere lo studio svolto nel seguito. E' dunque necessario individuare una missione tipicamente appartenente a questa classe di veicoli sul quale svolgere le analisi successive, sia per quanto riguarda il tragitto, prendendo come riferimento alcuni dei più utilizzati circuiti di omologazione, sia per quanto riguarda la movimentazione del braccio, usando pubblicazioni che trattino nello specifico dell'argomento. Per rispondere a queste esigenze si propongono differenti architetture ibride, sia in serie sia in parallelo, ognuna con i propri vantaggi e svantaggi. Passando poi per la modellizzazione dei vari componenti che costituiscono le diverse architetture, è possibile effettuare, per mezzo di simulazioni numeriche, un confronto tra i consumi di carburante e di energia elettrica per determinare la struttura più appropriata allo svolgimento della missione. La tesi non vuol essere legata a un particolare caso di studio, ma essere uno strumento futuro di analisi per tutta la categoria del veicolo trattata su un qualsiasi profilo di missione scelto.

Ringraziamenti

Un ringraziamento particolare va ai miei genitori, a mia madre Alessandra che, come solo una mamma sa fare, è sempre stata di conforto e di aiuto nei momenti più difficili del mio percorso di studio e del mio percorso di vita, e a mio padre Dino, che è stato per me un riferimento certo e una mano salda a cui aggrapparsi anche quando le mie certezze vacillavano. Tutti e due grazie al loro supporto e ai loro sacrifici mi hanno permesso di arrivare dove sono adesso come uomo e come studente di ingegneria. Ringrazio la mia ragazza Anastasyia Motyl, per essermi stata accanto in questo percorso, per avermi incoraggiato a fare sempre meglio e per avermi supportato/sopportato nelle difficoltà con la sua energia e il suo sorriso. Ringrazio mia sorella Federica, che nonostante abbia dovuto sopportarmi per tutta la mia infanzia, mi ha sempre mostrato affetto. Ringrazio poi il mio coinquilino e amico Filippo Masseni, sempre presente quando ho avuto bisogno di una mano sia dal punto di vista professionale, sia nella vita di tutti i giorni. Ringrazio poi tutti i miei nonni, quelli che ancora mi sono accanto e quello che purtroppo non ci sono più, che mi hanno sempre amato e ispirato ad essere un uomo migliore, tutti i miei amici, che hanno alleggerito questo percorso con le loro risate e il loro affetto, i genitori della mia ragazza, che mi hanno fatto sentire in famiglia anche lontano da casa, tutti i miei parenti, che anche solo con il cuore, mi sono stati sempre accanto, e infine, ringrazio anche me stesso, per non aver mai mollato ed essere arrivato dove sono oggi.

Indice

Elenco delle tabelle	8
Elenco delle figure	9
1 Introduzione	11
2 Classificazione dei Veicoli Ibridi Elettrici	13
2.1 Gradi di Ibridizzazione	13
2.2 Dispositivi di accumulo energia	14
2.3 Posizionamento e Numero	14
2.4 Architetture	15
3 Descrizione del Caso di Studio	17
3.1 Quadro Normativo	17
3.1.1 Europa	18
3.1.2 Italia	19
3.2 Descrizione del Veicolo	19
3.3 Missione	21
3.3.1 Tragitto	21
3.3.2 Movimentazione Braccio	23
3.4 Descrizione Funzionale Soluzioni Ibride	26
3.4.1 Serie	27
3.4.2 Parallelo	29
4 Descrizione Modelli Numerici	31
4.1 Motore Elettrico	31
4.1.1 Motore elettrico trazione	32
4.1.2 Motore elettrico Centralina	34
4.1.3 Centralina Idraulica	35
4.1.4 Frenata Rigenerativa	36

4.2	Batteria	37
4.2.1	State of Charge	38
4.2.2	BMS	40
4.3	Motore termico	41
4.3.1	Motore Termico Serie	41
4.3.2	Motore Termico Parallelo	42
4.4	Logica di Controllo del Veicolo	46
4.4.1	Logica di Controllo Serie A	46
4.4.2	Logica di Controllo Serie B	48
4.4.3	Logica di Controllo Serie C	48
4.4.4	Logica di Controllo Parallelo	49
5	Risultati e Commenti	51
	Bibliografia	69

Elenco delle tabelle

3.1	Parametri del Veicolo.	20
3.2	Parametri WLTP.	21
3.3	Energia, Forza e Potenza richieste.	23
3.4	Parametri Missione Braccio.	24
3.5	Confronto Energia, Forza e Potenza richieste.	26
4.1	Dati Centralina Idraulica.	35
4.2	Parametri Celle Nissan LEaf da 40kWh.	37
4.3	Parametri Motore Termico Serie.	42
4.4	Parametri Motore Termico Parallelo.	43
4.5	Rapporti di Trasmissione.	44
4.6	Simboli Utilizzati in Diagrammi Logica di Controllo Veicolo.	47
5.1	Confronto dei Risultati per le diverse Architetture.	51

Elenco delle figure

2.1	Posizione del motore elettrico.	15
2.2	Schemi Architetture.	16
3.1	Segnali LEZ e ULEZ.	18
3.2	Segnale ZTL.	19
3.3	Schema MT162 EX.	20
3.4	Andamento della Velocità.	22
3.5	Andamento dell'accelerazione.	22
3.6	Andamento Altezza e Angolo Teta sul Tempo della Singola Operazione.	24
3.7	Cinematica del Pistone relativo alla Rotazione del Braccio. . .	25
3.8	Schema Pistone Allungamento del Braccio.	25
3.9	Configurazione Serie A.	27
3.10	Configurazione Serie B.	28
3.11	Configurazione Serie C.	29
3.12	Configurazione Parallelo.	30
4.1	Mappa Efficienza HVH250.	32
4.2	Ingombri HVH250.	33
4.3	Punti di Funzionamento della Missione di Trazione sulla Map- pa del Motore Elettrico.	33
4.4	Punti di Funzionamento della Missione del Braccio sulla Map- pa del Motore Elettrico.	34
4.5	Mappa Efficienza Motore da 30 kW.	35
4.6	Andamento della Coppia Rigenerativa al 70% sulla Coppia Fre- nante.	36
4.7	Δ SOC e SOE per differenti C rate.	39
4.8	Voc e Resistenza sullo SOC.	39
4.9	Andamento Caricamento Batteria.	40
4.10	Mappa BSFC per Motore Termico 1500cc.	42
4.11	Mappa Efficienza Gruppo Motore Termico e Motore Elettrico. .	43
4.12	Mappa BSFC per Motore Termico 2500 cc.	44

4.13	Andamento Rapporti.	45
4.14	Andamento Velocità di Rotazione del Motore Termico.	45
4.15	Schema Logica di Controllo del Veicolo.	46
4.16	Schema Logico per Serie A.	47
4.17	Schema Logico per Serie B.	49
4.18	Schema Logico per Parallelo.	50
5.1	Andamento dello SOC per Batteria da 40 kWh.	52
5.2	Andamento dello SOC per Batteria da 20 kWh.	53

Capitolo 1

Introduzione

In questi tempi è diventata sempre più importante la continua ricerca di sistemi che permettano di ridurre il consumo di combustili fossili attraverso l'ottimizzazione di sistemi già esistenti o l'implementazione di nuove tecnologie. Da anni ormai, tutte le più grandi case automobilistiche sono impegnate, sotto le direttive della comunità europea o degli enti predisposti a tale compito, nell'abbassare il livello delle emissioni aumentando l'efficienza dei già diffusi motori termici e dei sistemi catalitici, adottando inoltre sistemi ibridi con l'intento di sostituire del tutto o almeno in parte l'utilizzo del combustibile fossile.[1, 2]

Attualmente la diffusione dei veicoli ibridi, o addirittura solo elettrici, sta aumentando considerevolmente, grazie anche al lavoro di sensibilizzazione sulla clientela ormai non più così legata alle tradizionali vetture diesel e benzina, e sempre più attenta alla salute del nostro ecosistema.

In virtù di quanto detto, il fulcro del lavoro svolto è l'analisi dell'utilizzo di queste tecnologie e architetture nel settore Light-Duty che, seppur rilevante, solo più di recente è stato oggetto di attenzione e studi. Per quanto riguarda infatti il campo Light/Heavy-Duty non è disponibile la scelta diversificata e ampia di opzioni di acquisto che invece è disponibile nel campo automobilistico. Si è quindi analizzato il comportamento e l'effetto che questo tipo di applicazioni avrebbero sull'utilizzo in caso di veicoli commerciali leggeri, utilizzando per modello di riferimento un veicolo Nissan Cabstar, modificato per il sollevamento, dotato di braccio articolato alimentato da una centralina idraulica. Lo studio può essere poi esteso ad altre vetture dello stesso settore andando a modificare il dati di input della simulazione.

Per realizzare queste simulazioni è stato necessario individuare una missione tipo per un veicolo appartenente a questa categoria, avvalendosi di circuiti

di omologazione per quanto riguarda la parte del tragitto, e dell'esperienza per quanto riguarda invece la missione svolta unicamente dal braccio. Utilizzando poi il pacchetto Simulink, del programma Matlab, si è elaborato un modello che includesse le principali componenti meccaniche, idrauliche ed elettriche del veicolo, strutturate secondo diverse architetture, e gestite da una logica di controllo che tenesse conto delle esigenze della missione andando di volta in volta a ottimizzare l'utilizzo del motore elettrico e del motore termico in funzione delle loro caratteristiche.

L'obiettivo finale è quello di confrontare le diverse architetture al fine di individuarne la più performante, andando inoltre a confrontare i risultati modificando alcune delle componenti meccaniche o elettriche per verificare il corretto dimensionamento, anche compatibilmente con le energie richieste. Una volta infatti verificata la veridicità del modello si è cercato di fare un confronto non solo tra le diverse topologie, ma anche tra i risultati ottenuti utilizzando diversi dimensionamenti del pacco batterie o utilizzando motori di produttori differenti.

Per comprendere al meglio però le argomentazioni cui la tesi fa riferimento è necessaria una classificazione dei diversi gradi di ibridizzazione che è possibile ottenere, e analizzare nello specifico le diverse tipologie di architetture che sono qui modellizzate.

Capitolo 2

Classificazione dei Veicoli Ibridi Elettrici

In questo capitolo sono analizzate alcune delle principali classificazioni per quel che riguarda i veicoli ibridi. Queste classificazioni aiutano ad inquadrare il tipo di tecnologie utilizzate e il perchè delle varie assunzioni fatte. Molto spesso queste classificazioni però non sono nette, si possono trovare ad esempio veicoli che usufriscono di uno o più sistemi di stoccaggio di energia diversi, così come a volte può essere difficile collocare un sistema in una o nell'altra classe di ibridizzazione.

2.1 Gradi di Ibridizzazione

A seconda del grado di ibridizzazione, ovvero quanto è rilevante la potenza elettrica rispetto alla potenza totale che il veicolo può generare, possiamo definire 3 differenti livelli:

- *Minimal-hybrid*, spesso confusa con il sistema di start and stop, non consente alcuna trazione senza l'utilizzo della potenza del motore termico e il contributo della potenza elettrica è generalmente al di sotto del 10%.
- *Mild-hybrid*, in cui la potenza elettrica non è in grado di sostenere da sola un ciclo di omologazione e contribuisce per il 10-30%.
- *Full-hybrid*, dove la sola componente elettrica è in grado di eseguire tutta la missione del ciclo di guida e la potenza elettrica contribuisce per un 30-50%.

In alcuni casi i veicoli dotati di *start and stop* vengono impropriamente definiti *Micro-Hybrid*, ma di fatto non c'è alcuna modifica al sistema propulsivo.

2.2 Dispositivi di accumulo energia

Una seconda classificazione può essere fatta sul tipo di dispositivo utilizzato per lo stoccaggio dell'energia elettrica. Questi componenti possono essere anche utilizzati come mix delle singole soluzioni a seconda delle varie esigenze previste per l'utenza o degli ingombri disponibili sul veicolo.

- *Batterie*: hanno una densità energetica inferiore rispetto al carburante, e il loro dimensionamento comporta la possibilità di massimizzare o la loro capacità di accumulare energia o di scambiare potenza, o un mix delle due. Sono molto sensibili alle condizioni di temperatura essendo basate su processi elettrochimici, che quindi dipendono dal buono stato di conservazione di elettrodi ed elettroliti.
- *Supercondensatori*: la loro densità energetica è maggiore rispetto a quella delle batterie così come la loro massima potenza scambiabile, ma non conservano l'energia per tempi medio-lunghi.
- *Volani*: sono messi in rotazione da una macchina elettrica e conservano l'energia sotto forma di energia cinetica. Il processo è completamente meccanico e comporta problemi di controllo differenti dai due esempi precedenti.

2.3 Posizionamento e Numero

Si possono distinguere veicoli con una o più macchine elettriche come:

- *SEM*, ovvero veicoli a singola macchina elettrica.
- *EM's*, o veicoli con più macchine elettriche.

Inoltre ha senso classificare i veicoli anche in base alla posizione in cui il motore elettrico viene montato. In Fig. 2.1 sono mostrate le possibili configurazioni che determinano le varie categorie. Si ottengono quindi le seguenti classificazioni:

- *P0*, il motore è montato sull'avviamento.

- $P1$, il motore elettrico è montato sull'albero motore.
- $P2$, il motore elettrico è montato all'ingresso della trasmissione.
- $P3$, il motore elettrico è montato dopo la trasmissione.
- $P4$, il motore elettrico è montato sull'asse della ruota.

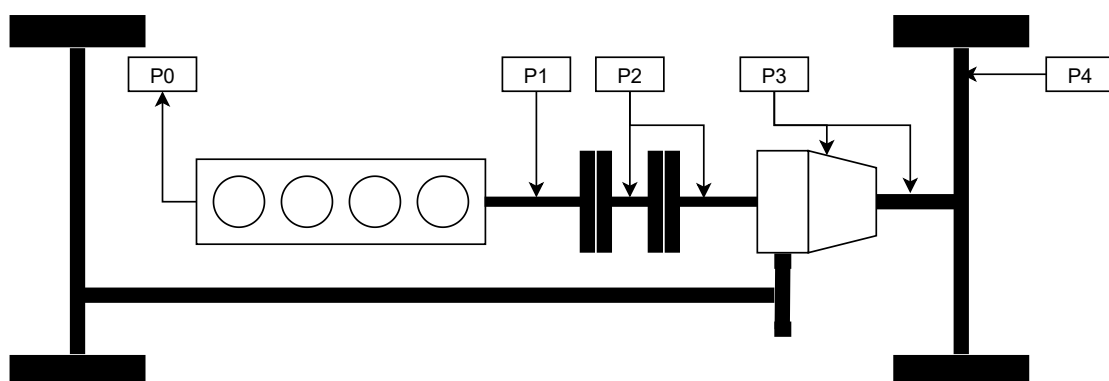


Figura 2.1. Posizione del motore elettrico.

2.4 Architetture

La più importante suddivisione che è possibile effettuare sui veicoli ibridi è quella dettata dall'architettura del sistema propulsivo, che determina come le risorse vengano impiegate durante la missione e come siano collegate tra loro sia meccanicamente che logicamente. Si individuano tre principali categorie, alle quali poi negli anni se ne sono aggiunte sempre di nuove andando di volta in volta ad inserire elementi per ottimizzarne il funzionamento.

- *Ibrido Serie*: è il più simile alle architetture elettriche pure in quanto il motore termico è svincolato dalla rotazione delle ruote. Infatti è il motore elettrico a dare direttamente energia meccanica alla trazione, energia che viene presa, sotto forma di energia elettrica, da un pacco batterie collegato a sua volta a un generatore. Generatore e motore termico sono invece collegati meccanicamente permettendo quindi al motore di fornire energia senza vincoli sulla velocità di rotazione, andando così a ottimizzarne l'efficienza.

- *Ibrido Parallelo*: il motore termico non è più svincolato dal movimento delle ruote, di conseguenza è la parte dominante dal punto di vista energetico. Il motore elettrico invece viene utilizzato per permette al termico di lavorare a potenza pressochè costante andando a colmare i picchi di potenza. Per queste ragioni é consentito un minore grado di downsizing rispetto alla architettura in serie.
- *Ibrido Misto*: è l'architettura che permettere, tramite l'ormai popolare tecnologia del power split, di usufruire dei vantaggi di entrambe le architetture prima citate, potendo cambiare da una logica all'altra, a scapito però di una maggiore complessità e di un elevato costo (sono necessari infatti due motori elettrici e il power split stesso).

In realtà per sistemi più complessi rispetto alla semplice autovettura si posso ottenere strutture diverse tra loro che però continuano ad appartenere allo stesso tipo di architettura.[12]

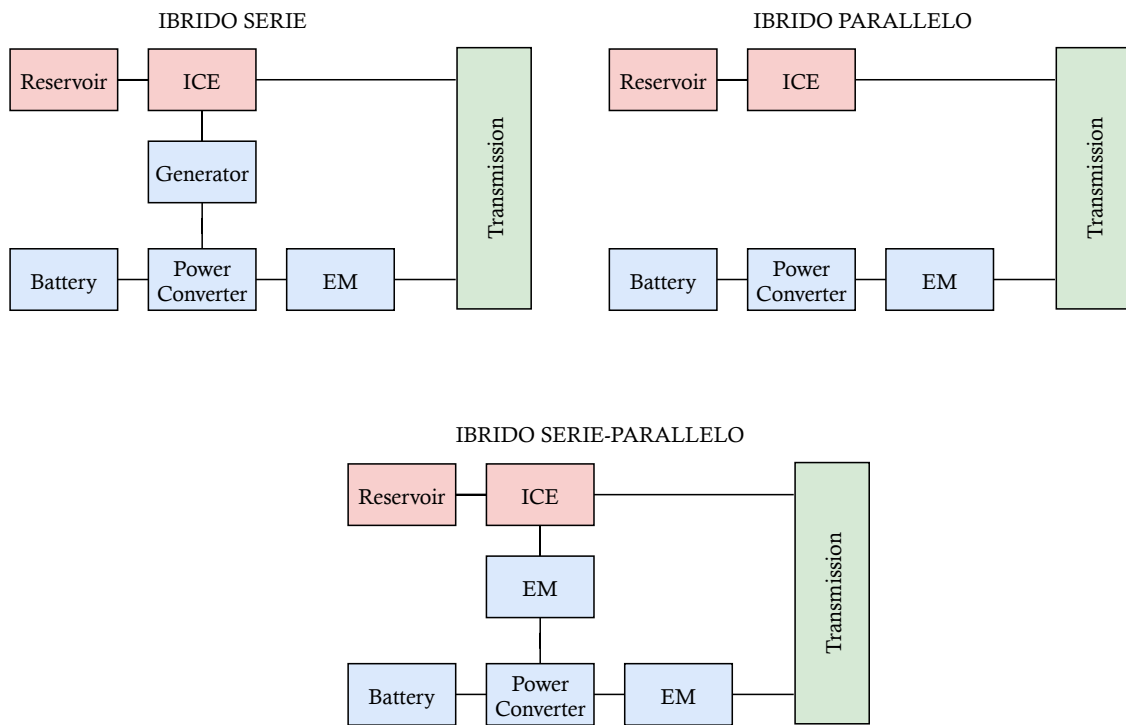


Figura 2.2. Schemi Architetture.

Capitolo 3

Descrizione del Caso di Studio

In questo capitolo sono evidenziati i motivi e gli obiettivi che supportano il lavoro svolto. Si analizzano infatti le esigenze che hanno portato le case produttrici e gli utenti a muoversi in direzione dell'ibrido elettrico, andando poi a definire un target di missione che tenga conto di alcune tipiche situazioni di lavoro sul quale poi effettuare delle simulazioni. E' utile inoltre approfondire la conoscenza della aziende operanti nel settore dell'ibrido per quanto riguarda la classe di veicolo presa in considerazione nel corso di questo lavoro di tesi, per capire quali possano essere i possibili competitor in questa determinata fascia di mercato.

3.1 Quadro Normativo

Lo sviluppo delle tecnologie per l'ibridizzazione dei veicoli è il risultato, oltre che della sensibilizzazione alla cura dell'ecosistema, delle sempre più stringenti norme sulle emissioni consentite e sui requisiti di salubrità dell'aria richiesti da tutti gli organi legislativi mondiali. Infatti gli stati appartenenti a queste organizzazioni sono obbligati ad adottare politiche, le cui linee guida vengono definite dalle organizzazioni stesse, atte a ridurre la presenza di sostanze inquinanti nelle zone urbane. Queste sostanze nocive, come per esempio il particolato, gli NOx, gli SOx che sono i prodotti di scarto della combustione, sono considerate molto pericolose per la salute dell'uomo. A differenza della CO₂, che è una molecola molto stabile e per la quale la riduzione dei veicoli

inquinanti nelle sole zone urbane non rappresenta una soluzione appropriata, queste particelle hanno una influenza inquinante solo entro certi limiti di spazio. Per questo una delle contromisure utilizzate per abbassare i livelli di inquinamento dell'aria è l'adozione di zone in cui l'accesso sia garantito solo a veicoli che rispettino stringenti parametri di emissioni inquinanti.

3.1.1 Europa

La comunità europea prevede che i paesi appartenenti rispettino le normative della direttiva 2001/81/EC rettificata poi dalla 2016/2284.[3, 4, 5] Nel rispetto di queste linee guida (nello specifico facendo riferimento all'articolo 6 della 2016/2284) nell'aprile del 2019 è nata la NAPCP (National Air Pollution Control Programme) che è l'organo addetto al controllo degli obiettivi da raggiungere negli anni 2020-2030. Sono state introdotte quindi le ZEZ, zone a zero emissioni, nella quale possono circolare veicoli solo elettrici, biciclette e in generale mezzi che non emettano nessun inquinante, e le LEZ, zone a basse emissioni, dove è consentito l'accesso ai veicoli solo in determinati orari, ai residenti e in ogni caso a veicoli ibridi, a moto di piccola cilindrata e a tutti quei mezzi che rispettino i ristretti limiti di emissioni.

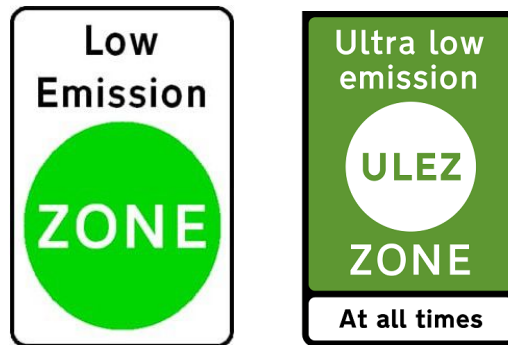


Figura 3.1. Segnali LEZ e ULEZ.

Negli ultimi anni la città di Londra ha introdotto la ULEZ, ovvero la zona a emissioni ultra basse, con limitazioni ancora più ristrette con l'intento di aumentarne l'utilizzo nella zona urbana londinese, e non solo, nei prossimi anni.

3.1.2 Italia

In Italia queste zone a bassa o a zero emissione sono note come ZTL, ovvero zone a traffico limitato, sempre rispettando la normativa europea, la cui regolamentazione specifica è però a carico dei singoli comuni. La manovra di bilancio del 2019 però specifica al comma 103 che questo diritto precedentemente detenuto dai sindaci non si applica in caso di veicoli ibridi.



Figura 3.2. Segnale ZTL.

Il comma 103 aggiunge di fatto un comma aggiuntivo all'articolo 7, comma 9, del codice della strada, di cui al decreto legislativo 30 aprile 1992, n. 285. E' quindi in ogni caso consentito l'accesso a veicoli ibridi in zone a traffico limitato, indipendentemente dalle normative comunali.

3.2 Descrizione del Veicolo

Il mercato dei veicoli ibridi è in continua crescita proprio per rispondere, anche a livello normativo, sia dalla parte di chi produce sia dalla parte dell'utilizzatore, a vincoli sempre più stringenti. Il settore preso in esame è quello dei veicoli commerciali, ed in particolare in questo lavoro di tesi si prenderà in considerazione una piattaforma aerea autocarrata. Alcune aziende hanno già cominciato ad investire nell'ibridizzazione di questo genere, come ad esempio la Merlo, Niftylift, Pulseo e tanto altre. Questo perchè la domanda è in costante crescita e le case produttrici cercano di proporre gamme di prodotti ibridi sempre più vaste. Per lo svolgimento delle simulazioni è stato utilizzato un veicolo Nissan modificato per l'utilizzo come piattaforma aerea. Nello specifico il veicolo è un Nissan Cabstar della flotta della Multitel Pagliero Spa, che da oltre 100 è uno dei leader del settore. In Fig. 3.3 sono mostrati gli ingobri del veicolo mentre in Tab. 3.1 sono riportati alcuni dei parametri del veicolo. Questi parametri saranno poi utili nel modello di

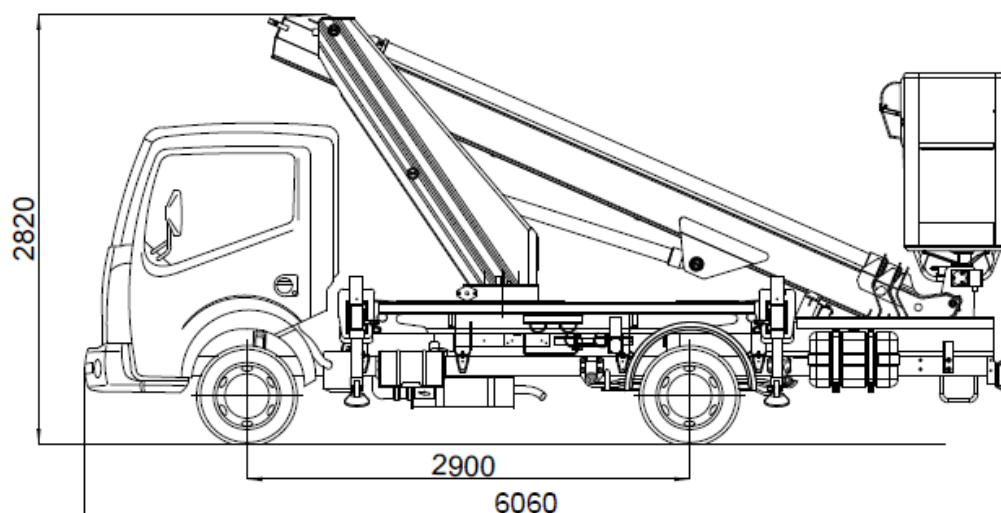


Figura 3.3. Schema MT162 EX.

simulazione per andare ad individuare le forze e le potenze necessarie al compimento di una determinata missione. Il caso specifico è servito per poter

Parametri	Quantità
Altezza massima lavoro [m]	16.15
Carico massimo [kg]	300
Sbraccio massimo (300 kg) [m]	10
Escursione Telescopica Massima [m]	6.71
Peso (senza carico) [m]	4500
Peumatici anteriori	175/80R15
Pneumatici posteriori (Double)	115R13
Area Frontale [m ²]	4

Tabella 3.1. Parametri del Veicolo.

raccogliere dei dati ed effettuare delle simulazioni quantitative, ma il metodo utilizzato nel seguito è valido per altri tipi di veicoli andando a modificare i paramentri utilizzati come input del modello.

3.3 Missione

Per poter effettuare un confronto tra le diverse architetture è necessario individuare una missione tipo sulla quale andare poi a stimare i differenti consumi in termini di energia. La missione deve essere composta dalle due componenti di tragitto e sollevamento del braccio articolato. Per quanto riguarda la parte relativa al tragitto si può fare riferimento ad alcuni dei circuiti di omologazione mentre per la movimentazione del braccio è più difficile trovare un riferimento che sia valido in qualunque situazione. Per determinare il carico di lavoro e i movimenti del braccio infatti ci si è affidati all'esperienza e al buon senso, lasciando comunque spazio ad una parametrizzazione per eventuali sviluppi futuri.

3.3.1 Tragitto

La componente della missione prettamente legata alla trazione del veicolo costituisce anche, nel caso preso in esame, la parte più gravosa dal punto di vista energetico. E' ragionevole considerare, per un veicolo di questo tipo, un tragitto effettuato in parte su percorso urbano e in parte percorso extraurbano. Un ciclo che consente di valutare le performance del veicolo in entrambe le situazioni è il WLTP, che ormai da qualche anno ha sostituito il NEDC come standard di omologazione per la maggior parte dei veicoli. In Tab. 3.2 sono riportati alcuni dati principali del WLTP, che poi nella missione complessiva di trazione del veicolo vengono ripetuti sia per il tragitto di andata che per quello di ritorno. Ciò che però veramente interessa è il profilo di velocità e di accelerazione, in Fig. 3.4 e in Fig. 3.5, previsto dal ciclo. Una volta infatti ottenuto questo andamento è possibile ottenere puntualmente la potenza necessaria a far muovere il veicolo lungo tutto il percorso stabilito.

Parametri	Quantità
Tempo di Percorrenza [s]	1800
Spazio Percorso [km]	24
Velocità Media [km/s]	46.5

Tabella 3.2. Parametri WLTP.

Usando la Eq. 3.1 si può determinare la forza necessaria a mantenere l'equilibrio dinamico del veicolo istante per istante.[6] Una volta fatto ciò si può

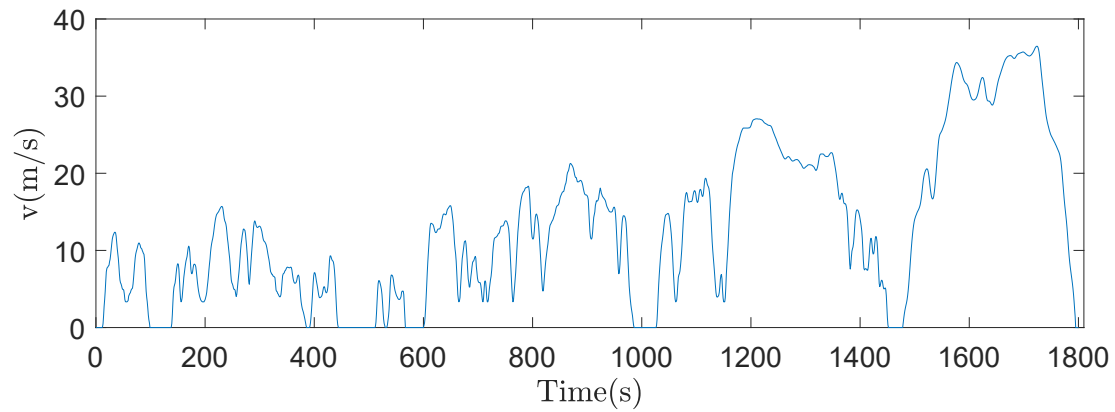


Figura 3.4. Andamento della Velocità.

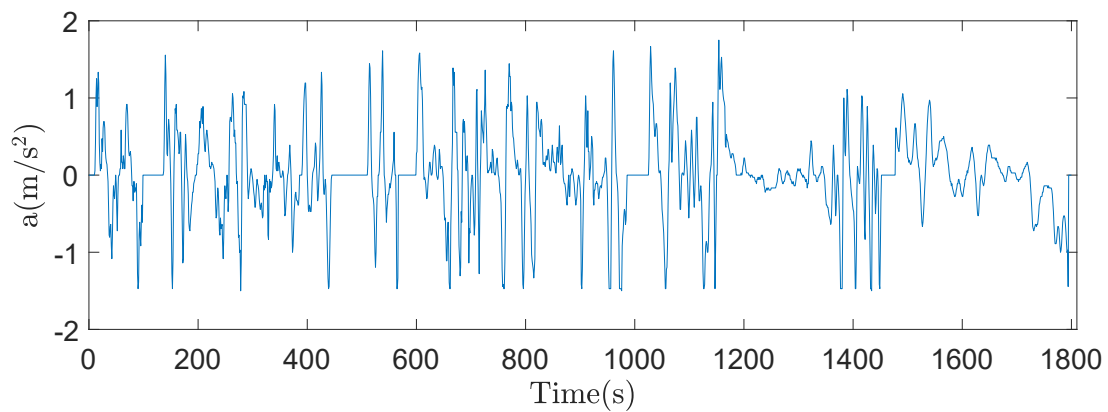


Figura 3.5. Andamento dell'accelerazione.

poi determinare la potenza istantanea richiesta utilizzando il profilo di velocità tramite l'Eq. 3.2 Questo servirà poi a determinare la potenza emessa dal motore elettrico e, attraverso la logica di controllo, stabilire poi quale sarà il contributo della alimentazione elettrica rispetto a quello della macchina termica. E' inoltre un dato fondamentale per il dimensionamento dei vari motori in quanto possiamo stabilire la massima potenza necessaria per il completamento del ciclo e quindi determinare, previa maggiorazione che

lasci comunque un certo margine di potenza ancora utilizzabile, la taglia della nostra macchina elettrica. In Tab. 3.3 è riportata la potenza massima e l'energia, ricavata dalla Eq. 3.3, necessaria per eseguire il ciclo con il nostro veicolo.

$$F = M_t \ddot{x} + 0.5 \rho_{aria} C_x A \dot{x} + \frac{d}{D} M_t g \sin \phi + M_t g \mu_v \frac{2}{D} \quad (3.1)$$

$$P = F_t x(t) \quad (3.2)$$

$$E_{tragitto} = \int_0^T P(t) dt \quad (3.3)$$

Parametri	Quantità
Forza Massima [kN]	9.86
Potenza Massima [kW]	150
Energia [kWh]	25.5

Tabella 3.3. Energia, Forza e Potenza richieste.

3.3.2 Movimentazione Braccio

Non esistono in letteratura cicli di lavoro standard per verificare le prestazioni di un braccio articolato. Si è quindi creata una missione per il movimento sollevatore ipotizzando un carico di lavoro in termini di peso e di spostamento, utilizzando esperienza e buon senso e tenendo conto che il movimento del braccio è generalmente composto da una parte rotazionale e una di allungamento per permettergli di raggiungere tutti i punti dello spazio di lavoro.

In Tab. 3.4 sono riportati i dati utilizzati per creare i profili di missione in termini di velocità e accelerazione, come mostrato in Fig. 3.6. Questi profili poi attraverso le Eq. 3.4, che descrivono la coppia necessaria per la rotazione e le Eq. 3.5, che descrivono la forza necessaria per l'allungamento, forniscono le informazioni per ricavare la potenza idraulica necessaria alla centralina per il compimento della missione.[7] E' inoltre necessario analizzare la cinematica del sistema per risalire attraverso le Eq. 3.6 alle forze esercitate sui rispettivi pistoni per valutare le effettive potenze idrauliche richieste.[8] Questi risultati sono stati poi confrontati con casi affini per accertare la veridicità

Parametri	Quantità
Numero alzate	14
Durata Missione [h]	8
Carico Braccio [kg]	300
Altezza di Lavoro	13
Distanza di Lavoro	7
Velocità Massima Rotazione [rad/s]	0.5
Accelerazione Massima Rotazione [rad/s ²]	0.2
Velocità Massima Allungamento [m/s]	0.5
Accelerazione Massima Allungamento [m/s ²]	0.5

Tabella 3.4. Parametri Missione Braccio.

del modello.[9] E' possibile poi calcolare, sulla base di questi risultati, i valori di portata e di pressione che la centralina idraulica deve sostenere durante il sollevamento del braccio articolato.[10] Da questi due dati poi si ricavano le perdite dovute al circuito oliodinamico in pressione, in termini di percentuale della pressione di funzionamento.[11]

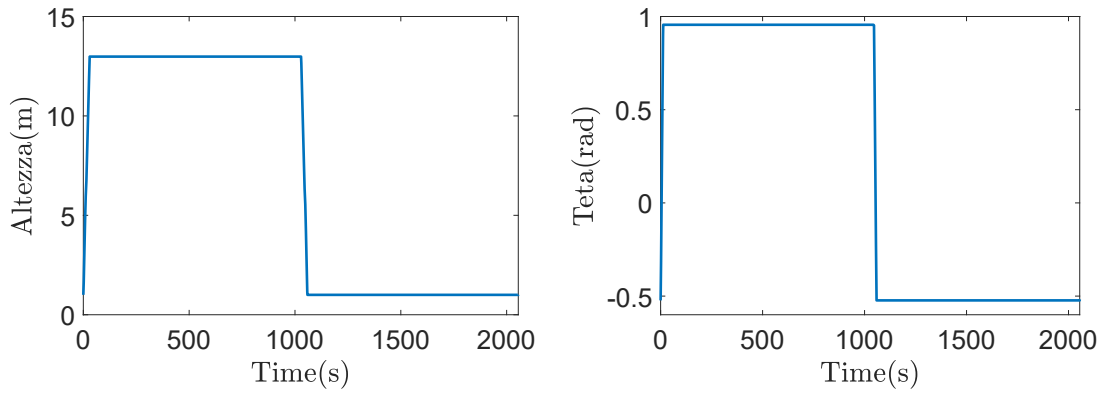


Figura 3.6. Andamento Altezza e Angolo Teta sul Tempo della Singola Operazione.

$$C(t) = \rho(mg + Mg) + I\ddot{\theta} + Mg\frac{L}{2}\cos\theta + mgL\cos\theta \quad (3.4)$$

$$F_{all} = M_{all}\ddot{x} + M_{all}g\sin\theta \quad (3.5)$$

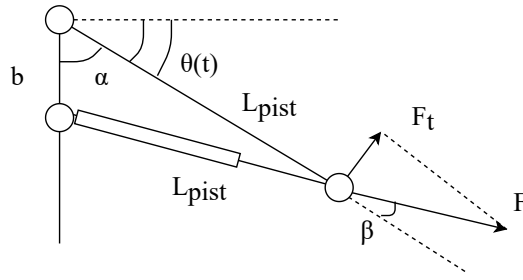


Figura 3.7. Cinematica del Pistone relativo alla Rotazione del Braccio.

$$\begin{aligned}
 L_{pist}(t) &= \sqrt{b^2 + L_b^2 - 2bL_b \cos \alpha} \\
 \beta &= \sin^{-1} \left(\frac{L_{pist}(t)}{b \sin \alpha} \right) \\
 F_t &= \frac{C(t)}{L_b} \\
 F(t) &= \frac{F_t}{\sin \beta} \\
 L(t) &= L_{pist}(t) - L_0 \\
 v(t) &= \frac{dL}{dt}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

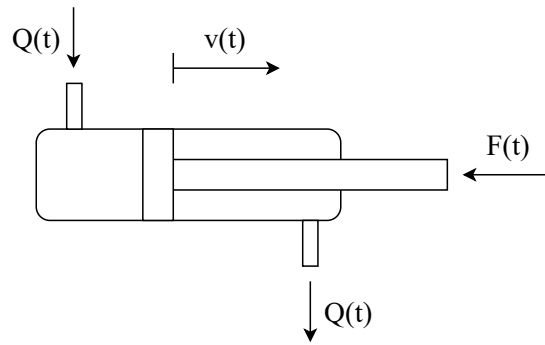


Figura 3.8. Schema Pistone Allungamento del Braccio.

$$P_{rot}(t) = (F(t) + A\Delta p_{loss})v(t) \tag{3.7}$$

$$P_{all}(t) = (F(t) + A\Delta p_{loss})v(t) \tag{3.8}$$

$$E_{rot} = \int_0^T P_{rot}(t) dt \quad (3.9)$$

$$E_{all} = \int_0^T P_{all}(t) dt \quad (3.10)$$

Equazioni Pressioni e Portata

Analogamente a quanto fatto per il tragitto è possibile quindi calcolare la massima potenza richiesta e l'energia complessivamente utilizzata. Come detto in precedenza per questo numero di alzate gli ordini di grandezza delle due missioni sono differenti. In realtà modificando in numero di alzate si potrebbero raggiungere energie confrontabili ma questo aumento è limitato da alcuni vincoli operativi (tempo necessario a svolgere operazioni in quota e a terra).

Parametri	Quantità
Potenza Massima Idraulica [kW]	22
Potenza Massima Trazione [kW]	150
Energia Missione Braccio [kWh]	1
Energia Missione Trazione [kWh]	25.5
Energia Totale [kWh]	26.5

Tabella 3.5. Confronto Energia, Forza e Potenza richieste.

In Tab 3.5 sono riportati i dati relativi a entrambe le missioni. I risultati ottenuti da questi calcoli saranno gli input delle varie simulazioni effettuate con le diverse architetture.

3.4 Descrizione Funzionale Soluzioni Ibride

Per soddisfare i requisiti richiesti dalle missioni precedentemente descritte si sono prese in esame le architetture in serie ed in parallelo. Si è quindi applicato lo schema delle due soluzioni tipiche del settore automotive ad una macchina più complessa costituita oltre che dalla parte dedicata alla trazione anche da una parte dedita alla movimentazione del braccio. Questo introduce differenti possibilità di strutturare il veicolo pur rimanendo all'interno di uno stesso tipo di architettura. Infatti si sono individuate tre possibili distinte architetture in serie ognuna con i suoi vantaggi e svantaggi che verranno messe a confronto nel seguito dell'elaborato.

3.4.1 Serie

La prima architettura presa in considerazione è quella in serie. Questo tipo di scelta ci permette un downsizing molto spinto proprio grazie alla possibilità di svincolare la velocità di rotazione del motore da quella delle ruote, facendo lavorare la macchina termica lungo la cosiddetta *Economic Line* che ne massimizza l'efficienza a parità di potenza erogata. Sono però presenti due utenze di energia meccanica all'interno del veicolo, il che, pur rimanendo nella classificazione dell'architettura in serie, apre la possibilità a diverse configurazioni.

Serie A

Una prima configurazione possibile è quella tale per cui il motore elettrico utilizzato per la trazione del veicolo sia lo stesso che alimenta la centralina idraulica, addetta invece alla movimentazione del braccio.

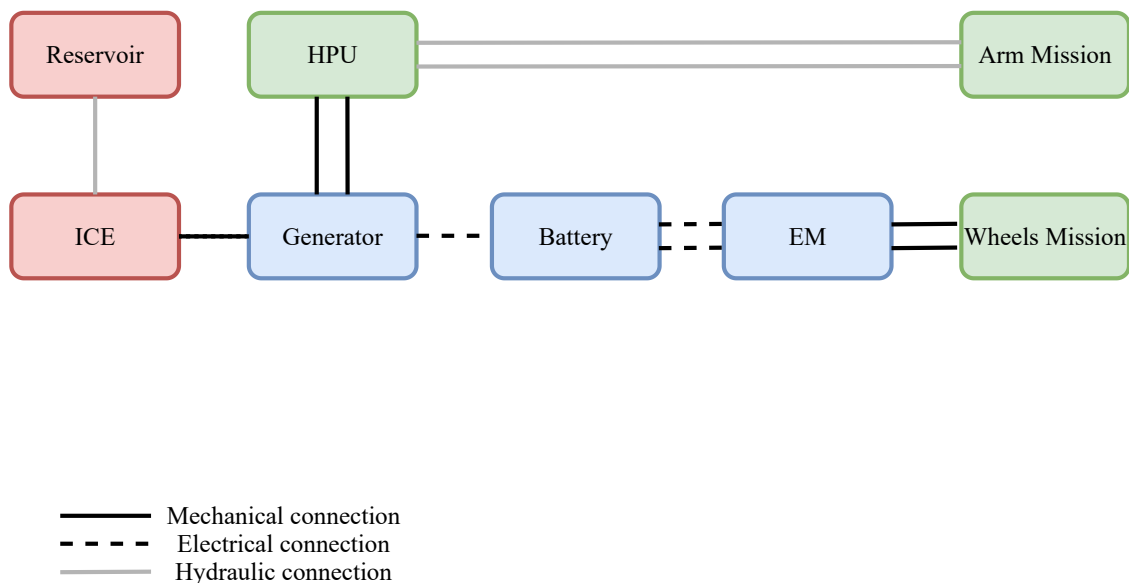


Figura 3.9. Configurazione Serie A.

Questa configurazione, mostrata nel dettaglio in Fig. 3.9, presenta un basso costo grazie alla presenza di un singolo motore elettrico e una maggiore semplicità di realizzazione. E' però evidente che, con la scelta di utilizzare la stessa macchina elettrica sia per il tragitto che per l'alzata, è impossibile far lavorare in un intorno di massimo rendimento entrambe

le configurazione. Non è comunque possibile ottimizzare la scelta per la missione di sollevamento del braccio in quanto, come visto in precedenza, le potenze richieste istantaneamente per l'una e per l'altra missione differiscono di un ordine di grandezza, e quindi la taglia della macchina elettrica sarà dettata dal poter svolgere la missione più gravosa.

Serie B

Una alternativa all'utilizzo dello stesso motore per l'alimentazione della trazione e del sollevamento del braccio consiste nel bypassare parte del sistema ed utilizzare il generatore come se fosse un motore elettrico.[13] La configurazione in Fig. 3.10 prevede infatti il collegamento della centralina idraulica con il generatore/motore elettrico permettendo quindi di aumentare l'efficienza del sistema evitando un possibile rendimento.

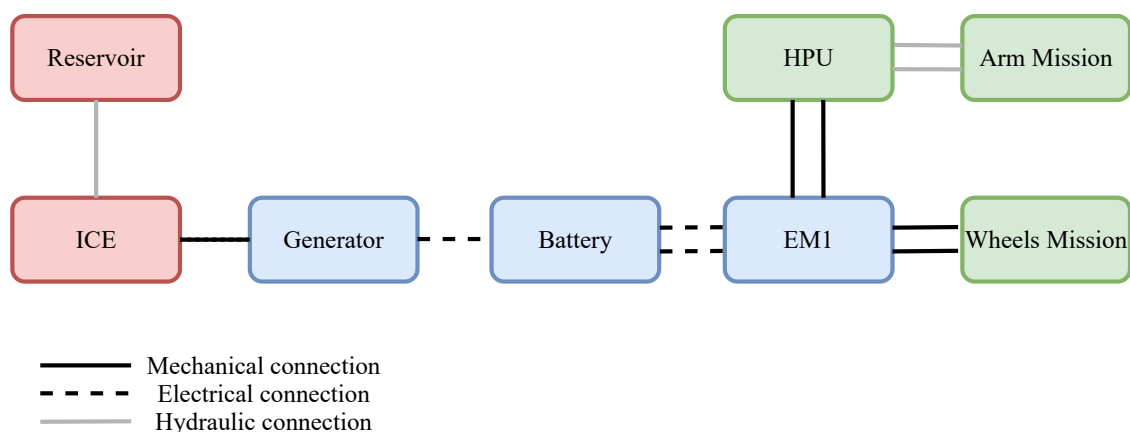


Figura 3.10. Configurazione Serie B.

Questa scelta comporta un sistema di logica di controllo leggermente più complesso e inoltre la riduzione di energia erogata è minima, almeno per missioni del braccio di sollevamento non eccessivamente gravose in termini di numero di alzate, ma di fatto l'architettura nel complesso è semplice quanto quella proposta dal sistema precedentemente visto. Infatti, anche in questo caso, il generatore è dimensionato per erogare una potenza confrontabile con quella della trazione del veicolo in termini di ordine di grandezza, e di conseguenza non ottimo per la missione del sollevamento del braccio.

Serie C

L'ultima configurazione esaminata è di fatto sempre un funzionamento in serie che però prevede l'utilizzo di due motori distinti, uno per l'alimentazione durante il tragitto e uno per la movimentazione del braccio articolato. Dalla Fig. 4.7 si evince immediatamente che il sistema è diventato più complesso rispetto ai due precedenti.

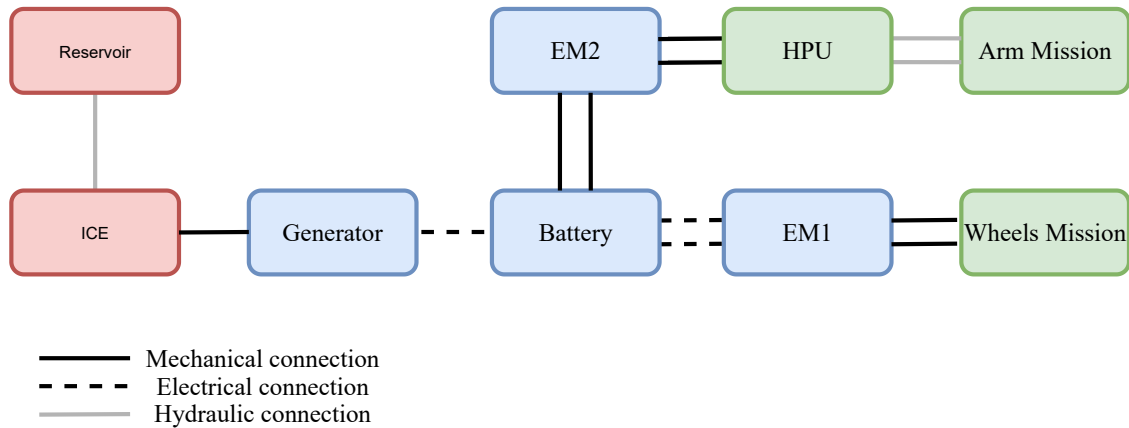


Figura 3.11. Configurazione Serie C.

La presenza di due motore elettrici separati comporta una maggiore complessità della logica di gestione, una maggiore quantità di componenti presenti sul veicolo e di conseguenza aumenta il rischio di malfunzionamento di un qualsiasi elemento del sistema. Con questo tipo di configurazione è possibile però ottenere un maggiore rendimento durante la missione di sollevamento del braccio, dovuto al fatto che in questa situazione la macchina elettrica che alimenta la centralina è dimensionata in modo tale da restituire la massima efficienza nell'intorno del punto di funzionamento.

3.4.2 Parallelo

L'utilizzo di una architettura in parallelo non prevede la possibilità di un downsizing molto spinto a causa del fatto che la velocità delle ruote vincola tramite un rapporto di trasmissione seppur variabile (cambio) la velocità dell'albero motore.[14, 15]

Il motore termico rimane dunque la principale fonte di alimentazione del sistema e viene aiutato nei picchi di potenza dal motore elettrico. In questo modo la macchina termica riesce a lavorare a potenza pressoché costante. La

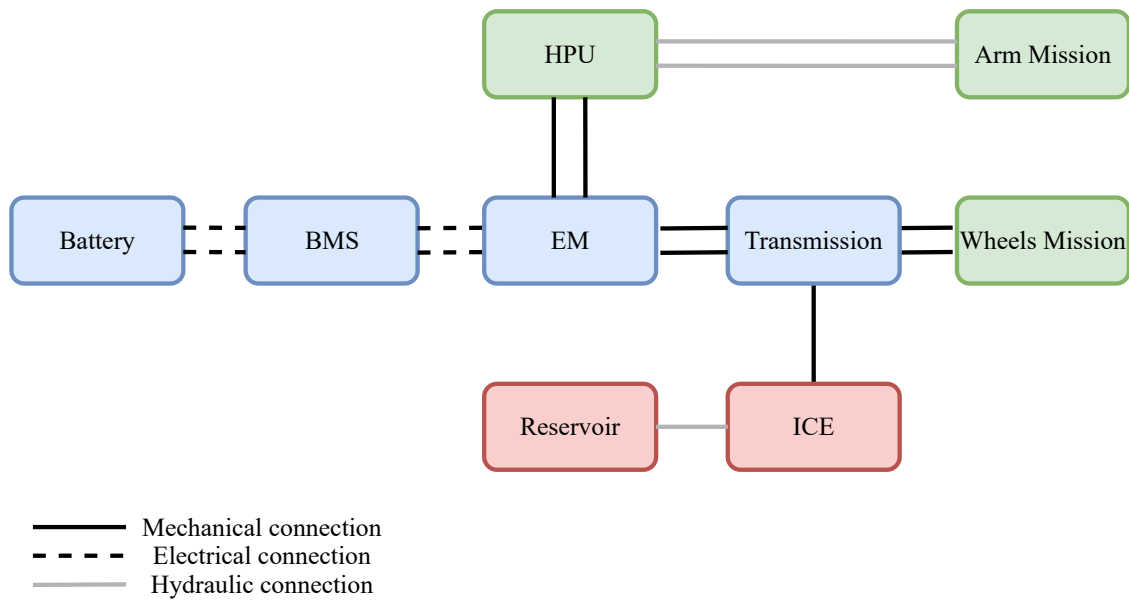


Figura 3.12. Configurazione Parallelo.

missione del braccio articolato è invece alimentata solo elettricamente utilizzando lo stesso motore installato sul veicolo per la trazione. Il posizionamento del motore elettrico è di tipo P2 per i motivi spiegati più nel dettaglio nell'articolo [16]. Ovviamente i consumi di combustibile risulteranno maggiori rispetto alle architetture in serie precedentemente analizzate, in virtù della maggiore energia fornita dal motore a combustione interna. Questo tipo di architettura però ha il grande vantaggio di poter essere implementata su una flotta di veicoli già esistenti. Infatti è possibile montare la componentistica necessaria all'ibridizzazione del veicolo anche se quest'ultimo non è stato progettato per la trazione elettrica.

Capitolo 4

Descrizione Modelli Numerici

In questo capitolo si analizzano tutti i componenti che costituiscono, sotto forma di blocchi, la simulazione. Ogni elemento può essere infatti considerato come una scatola in cui entrano delle informazioni che poi vengono rielaborate per restituire un output. Questo è alla base di ogni modellizzazione, e per fare ciò è importante conoscere le equazioni che regolano il comportamento del componente, o che quanto meno lo approssimo dell'intorno del punto di funzionamento. Una volta descritto il comportamento del singolo componente bisogna far sì che questo interagisca correttamente con gli elementi ad esso funzionalmente adiacenti. Dopo aver controllato che i singoli elementi siano correttamente modellizzati e che le loro relazioni siano coerenti, è possibile far partire le simulazioni che porteranno ai risultati per ognuna delle configurazioni precedentemente descritte

4.1 Motore Elettrico

Il primo fondamentale elemento da andare a scegliere e modellizzare è la macchina elettrica. Come detto in precedenza il più importante parametro da considerare, per il dimensionamento del motore, è la massima potenza da erogare per una determinata missione. Questa potenza deve essere inferiore alla massima potenza di picco del motore elettrico ad una determinata tensione di alimentazione. Si prenderanno in esame quindi il motore elettrico addetto alla trazione del veicolo, il generatore (lo stesso motore elettrico con

funzionamento inverso) ed il motore elettrico utilizzato nella configurazione in serie di tipo C per l'alimentazione della sola centralina idraulica.

4.1.1 Motore elettrico trazione

Per quanto visto in precedenza sappiamo che la missione tragitto è molto gravosa in termini di potenza meccanica richiesta. La ricerca di prodotti potenzialmente validi è stata svolta tenendo conto di questo parametro e ricercando una efficienza elevata in un ampio range di valori coppia-velocità. L'azienda BorgWarner, leader nel settore dei motori elettrici per veicoli ibridi, propone una vasta gamma di macchine elettriche con differenti taglie. La scelta effettuata è giustificata, come visibile in Fig. 4.2 e in Fig. 4.1, dall'ottimo rendimento su ampia scala, compattezza del componente, e prestazioni in termini di potenza tali da poter soddisfare le esigenze della missione.

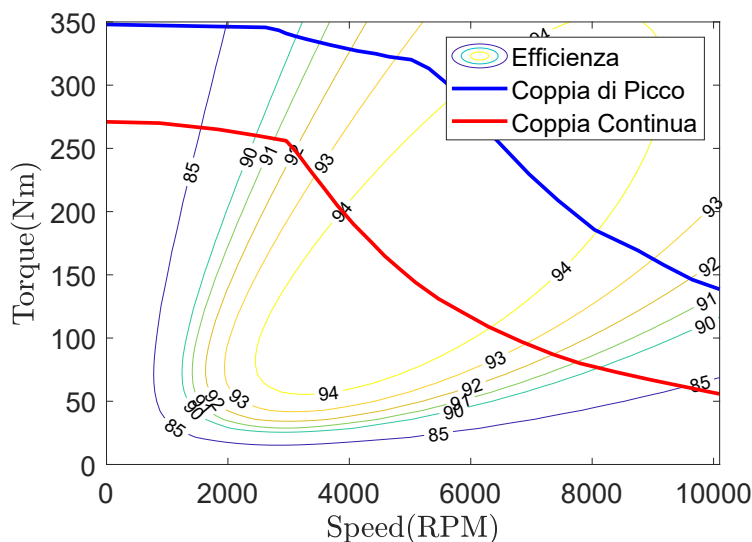


Figura 4.1. Mappa Efficienza HVH250.

La stessa macchina può essere inoltre utilizzata come generatore. Come detto in precedenza il motore elettrico è solitamente sprovvisto di un cambio. Il rapporto di ingranamento è fisso ed è facilmente ottenibile facendo sì che i punti di funzionamento della missione rientrino nel range di funzionamento del motore elettrico.

Nelle configurazioni in serie A e B e nel parallelo però il motore è utilizzato anche per l'alimentazione della centralina idraulica. Utilizzando quindi

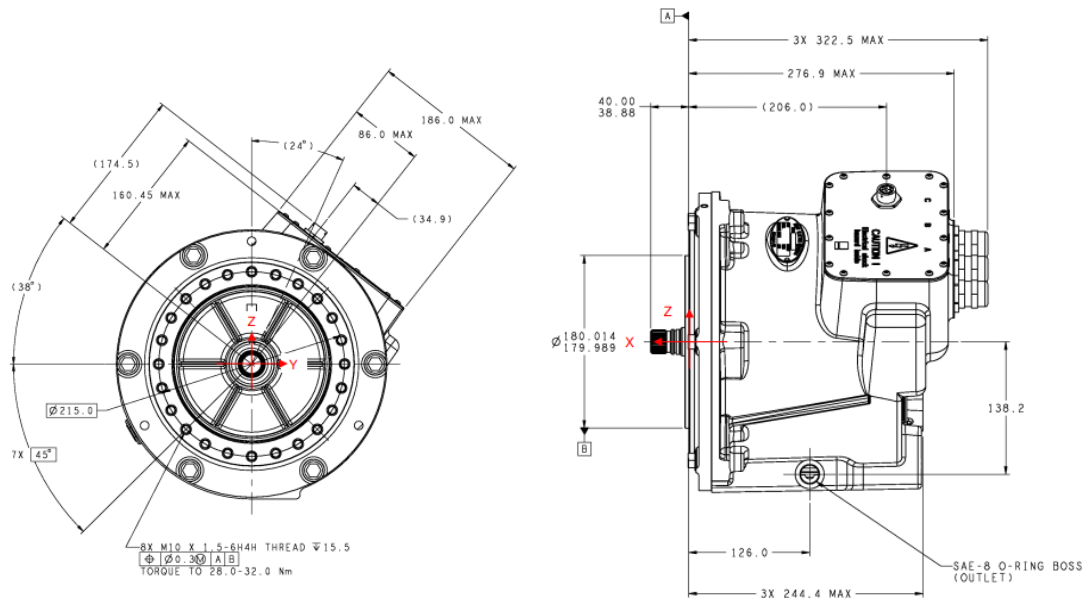


Figura 4.2. Ingombri HVH250.

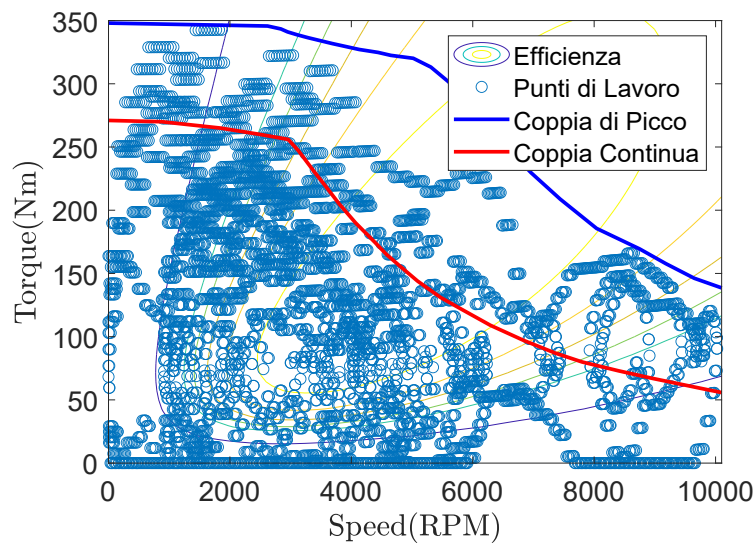


Figura 4.3. Punti di Funzionamento della Missione di Trazione sulla Mappa del Motore Elettrico.

i valori di coppia e velocità a cui la centralina deve lavorare per mantenere i valori di portata e pressioni necessari al compimento della missione possiamo individuare il rapporto di trasmissione analogamente a quanto fatto in

precedenza.

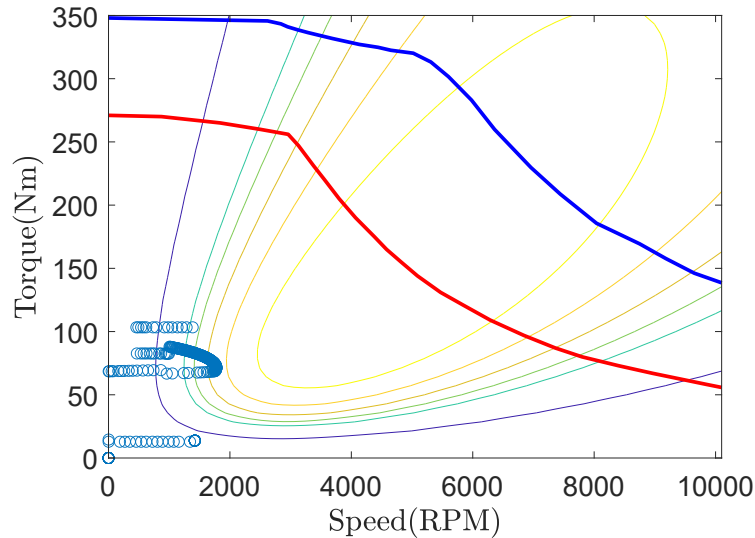


Figura 4.4. Punti di Funzionamento della Missione del Braccio sulla Mappa del Motore Elettrico.

Si può subito notare come nel caso del funzionamento del motore durante l'alimentazione della centralina si abbiano valori di rendimento molto più bassi che nel funzionamento durante la trazione del veicolo. Per quanto riguarda il generatore invece si dovrà scegliere un opportuno rapporto di trasmissione una volta scelto il motore termico.

4.1.2 Motore elettrico Centralina

Nella configurazione in serie di tipo C si ha un motore elettrico addetto alla sola alimentazione della centralina che quindi avrà una potenza massima confrontabile con quella richiesta dalla missione di sollevamento del braccio. Questo fa sì che il rendimento medio durante la missione sia leggermente maggiore con una riduzione sui consumi finali. In Fig. 4.5 è riportata la mappa di rendimento di un motore da 30 kW alimentato alla tensione di alimentazione di 400V.

Riportando i punti di funzionamento sulla mappa del motore elettricosi può notare come questi punti si trovino su punti della mappa a rendimento più alto rispetto al caso del singolo motore con doppia funzione. Il rapporto di trasmissione scelto in questo caso è uguale a 1.

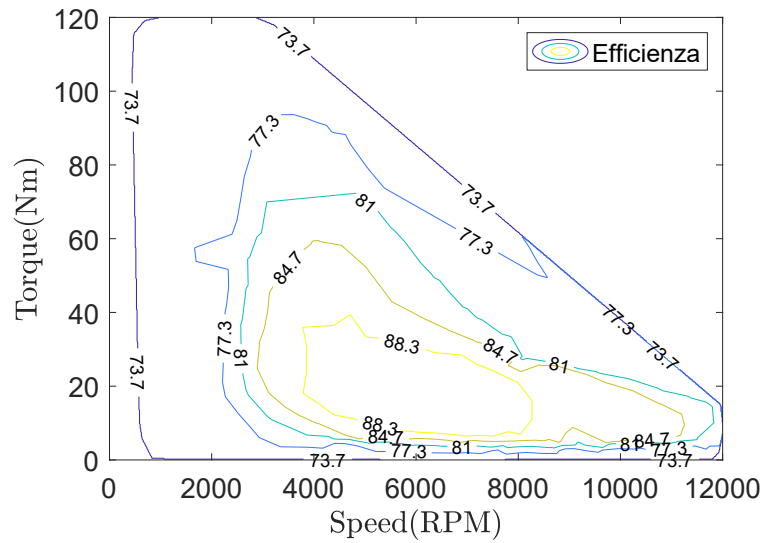


Figura 4.5. Mappa Efficienza Motore da 30 kW.

4.1.3 Centralina Idraulica

La scelta della centralina idraulica è stata fatta consultando i cataloghi di diverse case produttrici. Il modello scelto per le simulazione svolte è un pompa VP1 95 dell'azienda Parker. I dati caratteristici della pompa sono riportati in Tab. 4.1

Parametri	Quantità
Portata [cm ³ /giro]	95
Momento di inerzia [kgm ³]	0.00681
Pressione massima (Continua) [bar]	400
Pressione massima (Intermittente) [bar]	420

Tabella 4.1. Dati Centralina Idraulica.

Utilizzando poi le equazione base della delle pompe idrauliche è possibile ricavare i valori di coppia e il numero di giri necessari alla centralina per alimentare il sistema con la pressione e la portate richieste. I valori così ottenuti servono ad individuare un opportuno rapporto di trasmissione tra il motore elettrico e la pompa idraulica.

$$\begin{aligned}
q &= \frac{nD}{\eta_v 1000} \quad [l/min] \\
M &= \frac{\eta_{hm} \Delta p D}{63} \quad [Nm] \\
P &= \frac{\eta_t q \Delta p}{600} \quad [kW]
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Ovviamente otterremo valori migliori per un motore elettrico scelto ad hoc per far sì che questi punti si trovino a rendimenti molto elevati rispetto al dover utilizzare il motore elettrico, dedito alla trazione, anche per la movimentazione del braccio

4.1.4 Frenata Rigenerativa

Uno dei grandi vantaggi dell'utilizzo della trazione per mezzo di una macchina elettrica è quello di poter utilizzare quest'ultima come elemento resistente nel caso in cui venga richiesta una coppia frenante. Il motore infatti può imporre una coppia resistente che rallenta il veicolo e genera una potenza entrante nel sistema.^[17] Ovviamente questo sistema può avere vari gradi di influenza sul sistema frenante, passando da un leggero aiuto alla frenata, a quasi un sostituto dell'impianto frenante (sempre presente per motivi di sicurezza).

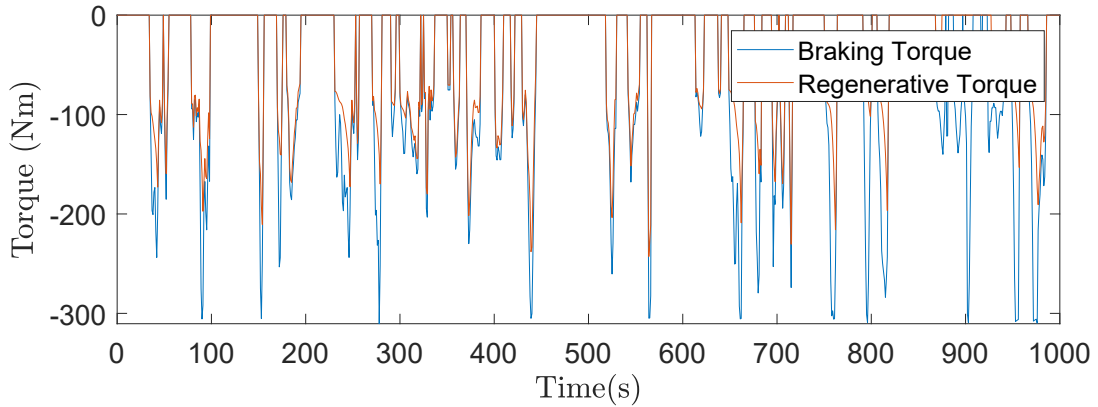


Figura 4.6. Andamento della Coppia Rigenerativa al 70% sulla Coppia Frenante.

Questo oltre a determinare quanta energia possa essere recuperata o meno, determina anche lo stile di guida del veicolo. In ogni caso trattandosi di

potenza in ingresso non possiamo superare il limiti di caricamento previsti per il corretto funzionamento della batteria, e quindi l'energia rigenerata sarà data dal minimo tra coppia frenante richiesta (per un coefficiente che ne determina il contributo alla frenata) e massima corrente di ricarica per il valore di tensione attuale della batteria.[18]

4.2 Batteria

Il dispositivo di accumulo scelto per il confronto delle varie architetture è la batteria. In particolare si è optato per una batteria Nissan Leaf da 40 kWh con ioni di litio e celle in nichel manganese e cobalto, le cui proprietà sono spiegate nel dettaglio nell'articolo [19], che presenta una ottima capacità rapportata al suo predecessore da 20 kWh. La scelta della batteria e della sua capacità massima sono molto importanti in quanto determinano la quantità di potenza che essa può istantaneamente dare o ricevere. Stando infatti a quanto suggerito dai produttori, per garantire un corretto funzionamento del dispositivo ed una longevità adeguata, non si dovrebbe superare una corrente di carica pari a circa l'80% del valore della massima capacità ed un valore di scarica circa uguale al 300% della massima capacità. In Tab. 4.6 sono riportati ingombri e dati della cella, che è l'elemento costitutivo della batteria. Il numero e l'accoppiamento di queste celle determina poi la performance della batteria.

Parametri	Quantità
Capacità Nominale [Ah]	56.3
Tensione Nominale [V]	3.65
Densità di energia [Wh/kg]	224
Lunghezza [mm]261]	261
Larghezza [mm]	216
Spessore [mm]	7.91
Massa [g]	914
Configurazione	2p96s

Tabella 4.2. Parametri Cella Nissan LEaf da 40kWh.

E' possibile quindi, conoscendo l'architettura della batteria, valutare la tensione nominale e la sua capacità totale, partendo dai dati della cella e utilizzando le Eq. 4.2.

$$T_{nom} = T_{cell} N_s \quad (4.2)$$

$$C_{tot} = C_{cell} N_p \quad (4.3)$$

4.2.1 State of Charge

Lo *state of charge* o *SOC* è definito dal rapporto della capacità attuale della batteria sulla sua carica massima.[20] E' probabilmente la più importante delle informazioni da considerare durante lo svolgimento della missione, in quanto determina la tensione di alimentazione attuale e ci da informazioni su quanto ancora la batteria potrà sostenere un determinato carico.[21] Molto spesso però è più utile, almeno al fine di derminare l'autonomia del veicolo, avere un valore rappresentativo della quantità di energia attuale rispetto a quella massima della batteria. Le due informazioni non sono di fatto coincidenti come significato seppur i loro valori siano pressochè identici. Infatti la Eq. 4.4 e la Eq. 4.5 sono formalmente diverse ma sperimentalmente è stato dimostato che la differenza di questi due valori per un *C rate* pari a 5, ovvero un valore di corrente pari a 5 volte la massima capacità della batteria, non supera il 3%.[22]

$$SOC = \left[1 + \frac{\int_0^T \eta I(t) dt}{C_n} \right] \quad (4.4)$$

$$SOE = \left[1 + \frac{\int_0^T V(t) I(t) dt}{C_n} \right] \quad (4.5)$$

$$\Delta SOCSOE = SOC - SOE \quad (4.6)$$

Come detto in precedenza quindi lo SOC influenza la tensione della cella e di conseguenza quella di tutta la batteria andando a modificare il valore di tensione di circuito aperto come mostrato in Fig. 4.8. Inoltre lo SOC influenza anche la resistenza interna che la batteria oppone al movimento degli ioni di litio seguendo l'andamento mostrato in Fig. 4.7

Dall'Eq. 4.7 e l'Eq. 4.8 è possibile quindi, istante per istante, ricavare il valore di tensione attuale della batteria. Durante la fase di carica, per quanto detto, in precedenza si dovrebbe avere una alimentazione della batteria a corrente costante, ed è di fatto quello che succede quasi sempre nel normale utilizzo. Quando però lo SOC raggiunge un limite tale per cui continuando ad alimentare la batteria a corrente costante, la tensione salirebbe oltre il valore di overvoltage, allora si passa a controllare la potenza entrante in tensione. Durante il controllo in tensione la carica della batteria diventa sempre meno

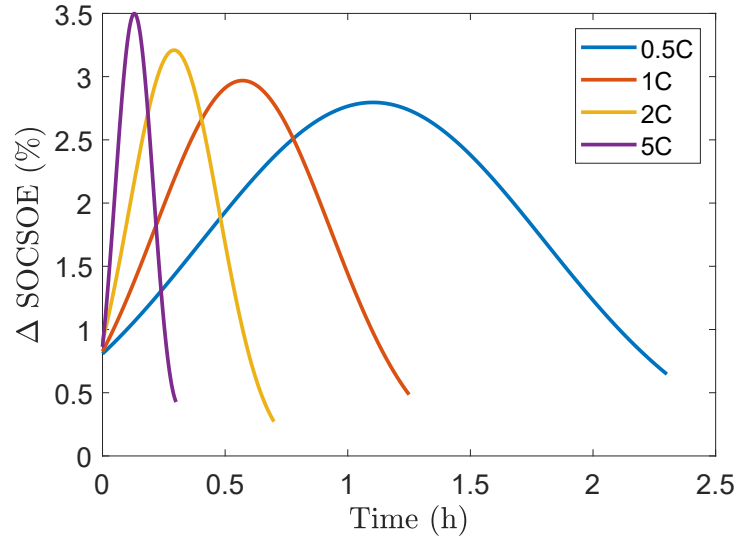


Figura 4.7. Δ SOC e SOE per differenti C rate.

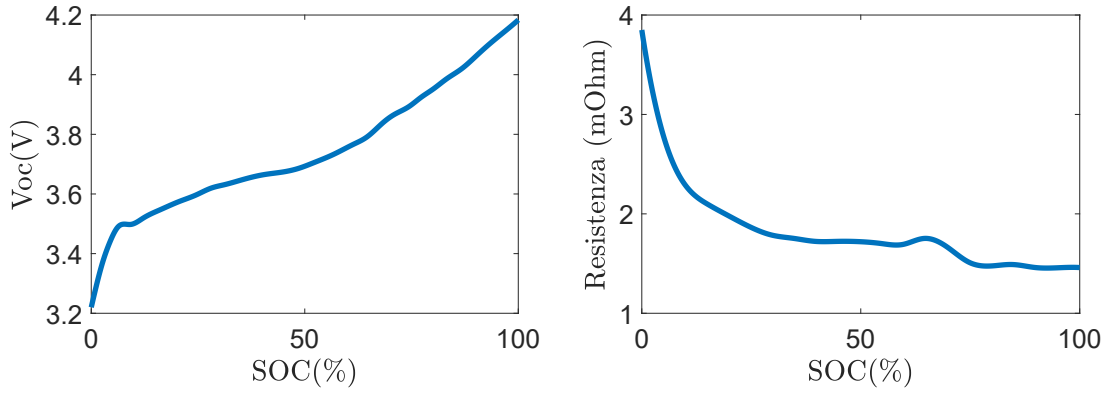


Figura 4.8. Voc e Resistenza sullo SOC.

efficiente e la corrente che la batteria è capace di sostenere senza che la tensione superi valori critici, decresce esponenzialmente con l'aumentare del tempo, come mostrato in Fig. 4.9.

$$V_{batt} = V_{oc}N_s - IR_{batt} \quad (4.7)$$

$$R_{batt} = R_{cell} \frac{N_s}{N_p} \quad (4.8)$$

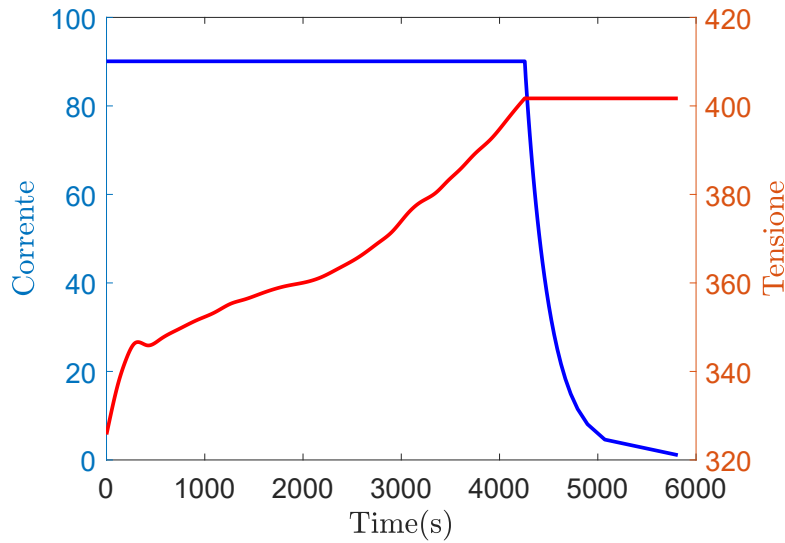


Figura 4.9. Andamento Caricamento Batteria.

Questa condizione di caricamento in realtà non si verifica mai durante il funzionamento del veicolo in quanto il *BMS* impedisce, come descritto nel capitolo successivo, alla batteria di raggiungere uno SOC superiore all'80%. Il rispetto di tutti questi accorgimenti è importante per far sì che la batteria mantenga il suo corretto funzionamento per un tempo di vita il più lungo possibile.

4.2.2 BMS

Il *BMS* è il componente della batteria che si fa carico del controllo delle singole celle, assicurando una corretta distribuzione di tensione e densità di carica, per migliorarne l'efficienza di funzionamento e garantirne una maggiore longevità. Il *BMS* monitora dunque non solo lo SOC, ma anche lo SOH, la temperatura e altri parametri che insieme forniscono un quadro completo sul funzionamento del componente. Il singolo valore dello SOC non è quindi sufficiente all'elemento logico per stabilire lo stato di salute della batteria. Questa informazione è integrata con lo SOH, che fornisce informazioni riguardo al deterioramento nel tempo della carica nelle celle. Importante è inoltre la temperatura operativa della batteria che può variare tra 0 e i 45 °C in fase di carica e tra -20 e +60°C in fase di scarica. È possibile mantenere questi range operativi grazie all'utilizzo delle ventole di raffreddamento,

la cui velocità di rotazione è comandata dal BMS per garantire un corretto flusso termico e mantenere su valori elevati il rendimento del sistema.[23, 24] La logica di controllo della batteria è generalmente fornita dal produttore insieme al pacco batteria stesso proprio per garantire ai clienti prestazioni elevate e longevità di utilizzo.

4.3 Motore termico

Il motore termico si interfaccia unicamente con il generatore nel caso dell'architettura in serie ed è invece direttamente collegato alla trasmissione nel caso della architettura parallela. Per i motivi detti nei precedenti capitoli la taglia del motore termico sarà diversa nei due casi e anche il suo contributo all'energia totale differirà per le due configurazioni. E' comunque presente un downsizing rispetto al caso in cui il motore termico fosse l'unica fonte di energia del sistema, ma in misura inferiore. Una volta individuata la potenza massima del motore termico è possibile attraverso le mappe del consumo specifico individuare la portata di combustibile istantanea e, integrandola poi nel tempo, la quantità complessivamente utilizzata al fine di compiere la missione.

4.3.1 Motore Termico Serie

Il motore termico scelto per le architetture in serie, le cui caratteristiche sono riportate in Tab. 4.3, è di taglia molto inferiore rispetto ad un motore che tipicamente avrebbe un veicolo di queste dimensioni se non fosse implementata una struttura ibrida. Come detto in precedenza questo è permesso dal fatto che la velocità di rotazione non è comandata dalla rotazione delle ruote, ma è decisa dalla logica di controllo del veicolo per garantire il valore di potenza desiderato. E' quindi possibile ipoteticamente far lavorare il motore termico a punto fisso andando poi ad utilizzare la potenza elettrica in caso di richiesta di coppia. In Fig. 4.10 è riportata la mappa del consumo specifico del motore che serve a calcolare la portata di combustibile per ogni punto di lavoro.

L'obiettivo però è quello di ottimizzare non solo il rendimento della macchina termica, bensì il rendimento del gruppo generatore-macchina termica. Per trovare il rapporto di trasmissione adeguato tra generatore e motore termico bisogna far sì che i punti di funzionamento del motore, comandati dal BMS, stiano nella mappa di funzionamento del generatore. E' quindi possibile infine determinare una mappa dei rendimenti del gruppo motore termico

Parametri	Quantità
Cilindrata [L]	1.5
Ciclo	Diesel
Coppia massima [Nm]	200

Tabella 4.3. Parametri Motore Termico Serie.

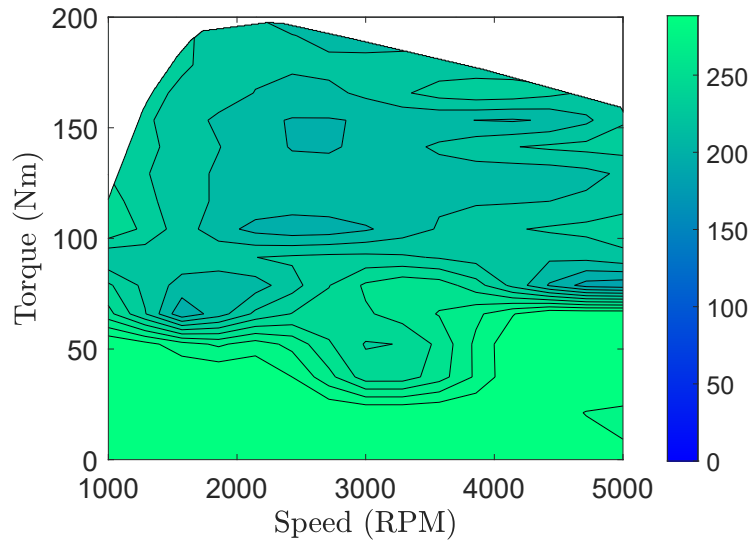


Figura 4.10. Mappa BSFC per Motore Termico 1500cc.

e generatore come in Fig. 4.11 e tramite l'Eq. 4.9 determinare una economic line. L'economic line servirà a stabilire a quale numero di giri e quale valore di coppia il motore termico dovrà lavorare a seconda del valore di potenza richiesto dalla logica di controllo.

$$Fuel = \int_0^T BSFC(t)P(t)dt \quad (4.9)$$

4.3.2 Motore Termico Parallelo

Nell'architettura in parallelo il motore termico non è più scollegato dalla trasmissione e quindi dovrà, supportata dal cambio, avere una velocità di rotazione relazionata alla velocità di rotazione delle ruote. Come riportato nella Tab. 4.4 la taglia del motore termico in questo caso è molto maggiore

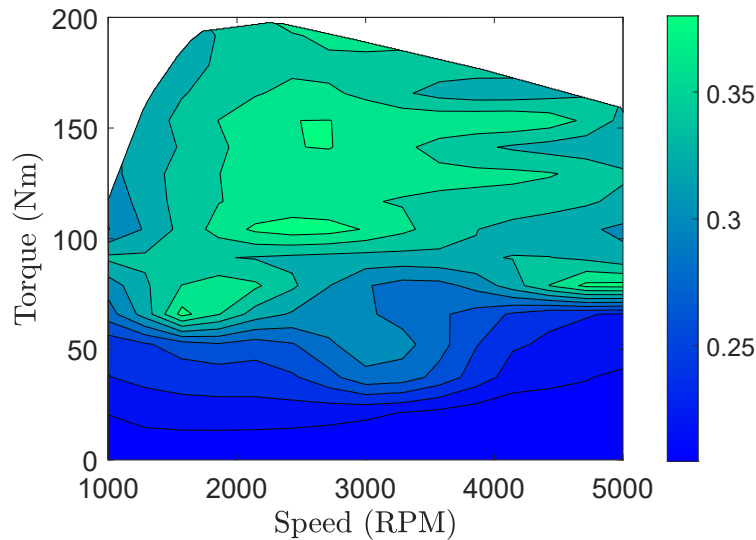


Figura 4.11. Mappa Efficienza Gruppo Motore Termico e Motore Elettrico.

rispetto a quella prevista per le architetture in serie, per poter erogare una potenza simile anche qualora la velocità di rotazione fosse bassa. In Fig. 4.12 è riportato il consumo specifico per i valori di coppia e rotazione del motore termico utilizzato e i suoi range di funzionamento.

Parametri	Quantità
Cilindrata [L]	2.5
Ciclo	Diesel
Coppia massima [Nm]	430

Tabella 4.4. Parametri Motore Termico Parallelo.

In questo caso non è necessario individuare una mappa generatore- motore termico perchè non è presente il generatore, ne tantomeno è possibile utilizzare una economic line, in quanto i punti di funzionamento sono comandati in velocità. E' però necessaria l'implementazione di un cambio, manuale o automatico, che limiti il range di velocità del motore nel suo dominio di funzionamento.

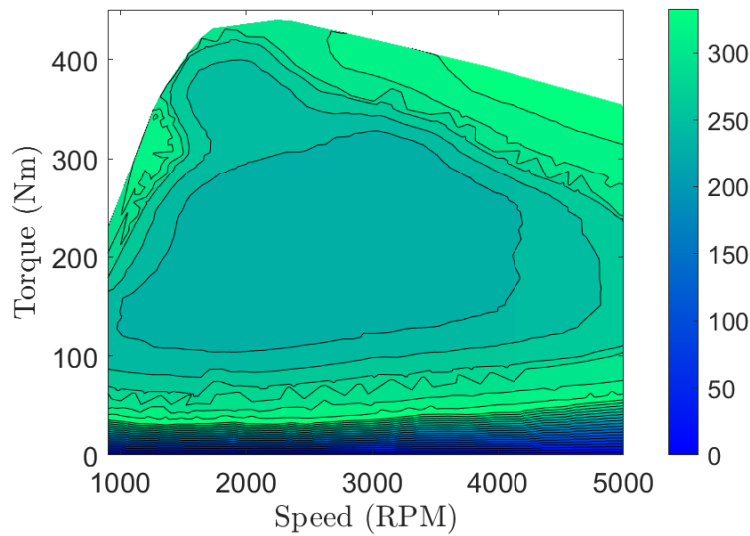


Figura 4.12. Mapa BSFC per Motore Termico 2500 cc.

Cambio Automatico

Per necessità dettate dall'utilizzo dell'architettura in parallelo è fondamentale quindi la presenza di un cambio, che accoppi il movimento delle ruote alla rotazione del motore, garantendo però un range di funzionamento valido. Per motivi fluidodinamici i motori diesel generalmente non possono superare i 5000 RPM. Si è scelto di utilizzare un cambio a 5 rapporti con un rapporto finale di 3.7, mantenendo invariati i rapporti di trasmissione rispetto all'architettura originale del veicolo mostrata in Tab. 4.5.

Marcia	Rapporto di Trasmissione
Prima	4.563
Seconda	2.528
Terza	1.390
Quarta	1.000
Quinta	0.789
Retromarcia	4.563

Tabella 4.5. Rapporti di Trasmissione.

Così facendo si ottengono un profilo di velocità e uno di cambio marcia,

in Fig. 4.13 e in Fig. 4.14, che fanno sì che il motore lavori in un range di funzionamento di velocità appropriato per questo tipo di macchina. Ovviamente ci saranno punti di funzionamento a basse velocità di rotazione che richiederanno certi valori di potenza, ottenibili solo con alti valori di coppia. Da qui la necessità di avere motori di cilindrata maggiore per questa tipologia di architettura, che possano erogare una maggiore coppia motrice e quindi fornire la potenza richiesta.

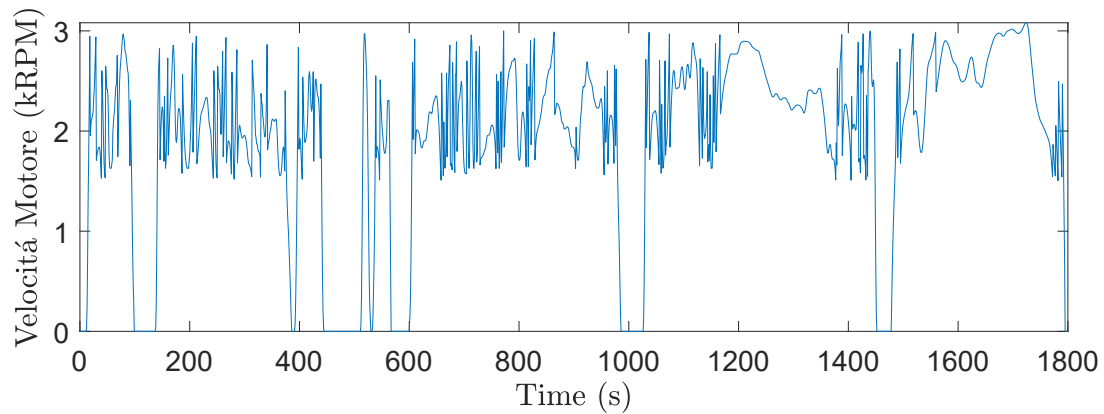


Figura 4.13. Andamento Rapporti.

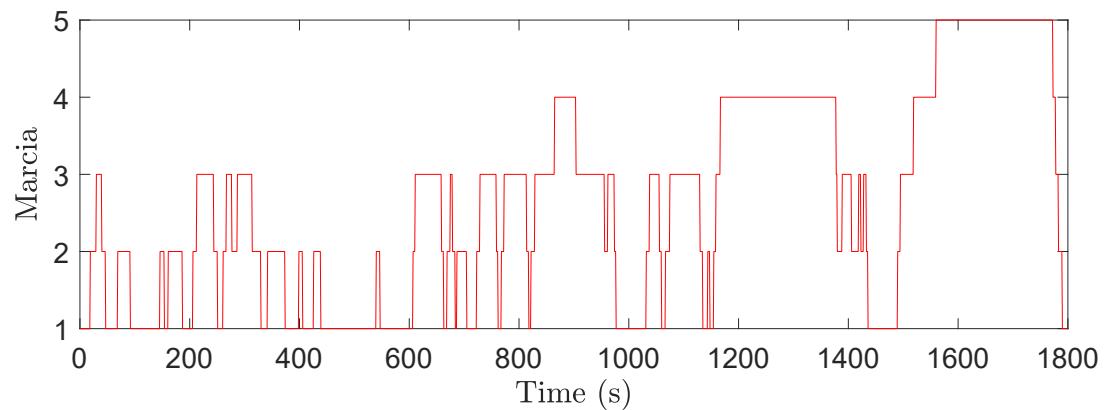


Figura 4.14. Andamento Velocità di Rotazione del Motore Termico.

4.4 Logica di Controllo del Veicolo

La *Logica di Controllo del Veicolo* è il componente logico che gestisce le velocità di rotazione del motore, del generatore, e l'erogazione o la suzione di potenza da parte della batteria. E' il core di tutta l'architettura e ne determina le caratteristiche di funzionamento. La logica di controllo deve quindi tenere conto di tutti comportamenti e di tutti i vincoli elencati nei capitoli precedenti permettendo però al veicolo di svolgere non solo la missione presa in esame, ma qualsiasi altro tipo di missione possibile (i parametri scelti per questo case study specifico non devono essere strettamente vincolanti).

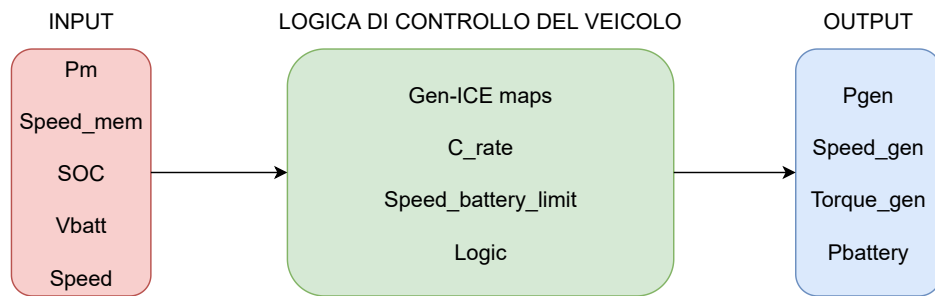


Figura 4.15. Schema Logica di Controllo del Veicolo.

Per fare ciò il questo elemento logico raccoglie dai vari componenti informazioni che serviranno poi ad elaborare una strategia appropriata, che vada sia ad ottimizzare i consumi, ma che garantisca il compimento della richiesta in tutte le sue fasi. Ovviamente la logica di controllo deve essere diversa per ogni architettura presa in esame, essendo il numero di componenti, o comunque la loro struttura, differente di volta in volta. Sistemi più complessi richiedono logiche di controllo più complesse.

4.4.1 Logica di Controllo Serie A

Si analizzano ora le logiche che regolano ogni singola tipologia di architettura presa in esame in questa tesi. L'architettura in serie di tipo A è la più semplice di tutte in quanto abbiamo un singolo motore elettrico addetto sia alla movimentazione del braccio sia alla trazione del veicolo. Per quanto riguarda il controllo del veicolo quindi c'è un unico componente che richiede potenza al sistema e due componenti a cui richiedere potenza. L'idea di fondo che sta alla base della logica mostrata in Fig. ?? è quella di utilizzare solamente l'energia della batteria durante le tratte urbane e durante la missione di

sollvamento del braccio, e di utilizzare per lo più l'energia fornita dal motore termico per il compimento del tragitto in tratta extraurbana. La secon-

Parametri	Significato
SOC	State of Charge
Vmem	Velocità media su 50 s
Pgen	Potenza Generatore
Pb	Potenza Batteria

Tabella 4.6. Simboli Utilizzati in Diagrammi Logica di Controllo Veicolo.

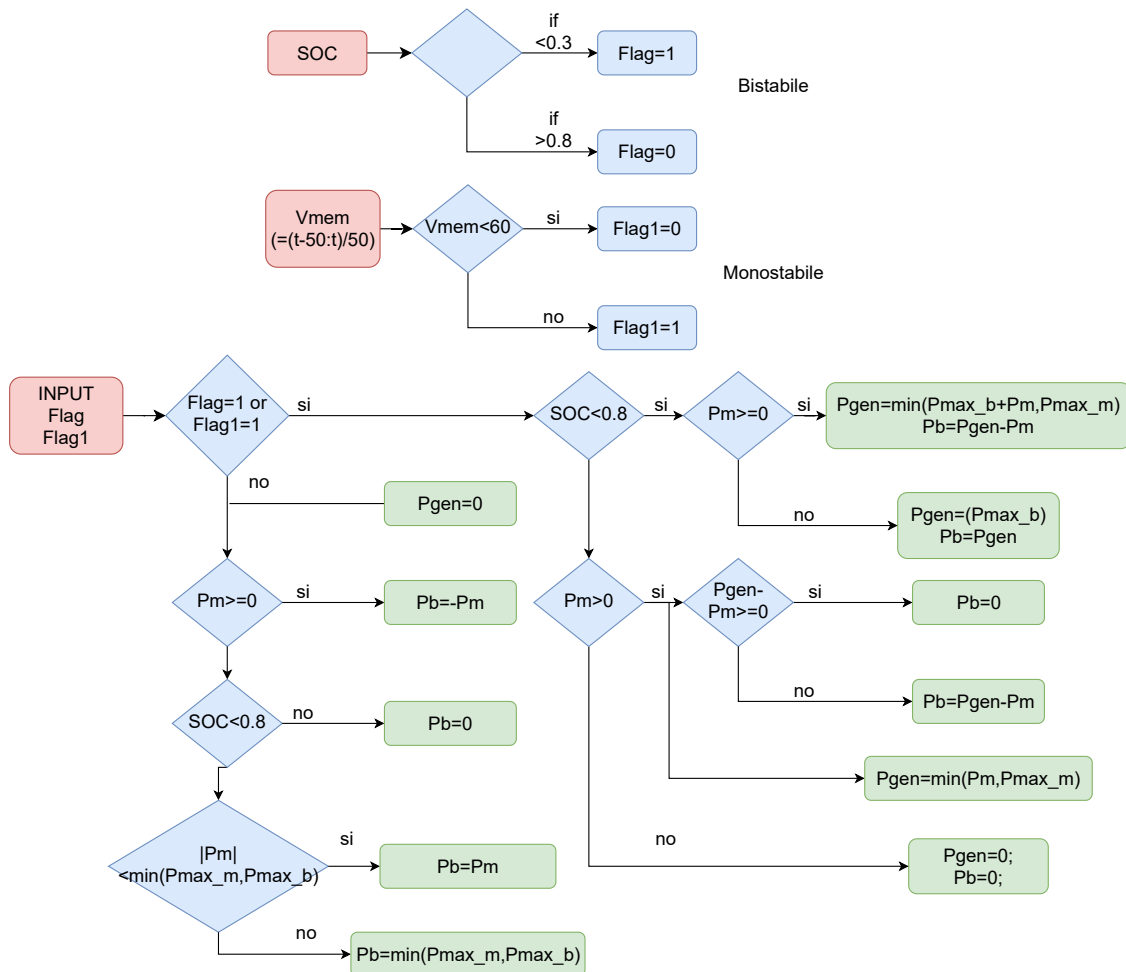


Figura 4.16. Schema Logico per Serie A.

da modalità di funzionamento è tale per cui il motore termico fornisce una potenza circa costante e al più lungo la sua economic line, supportato dalla batteria solo per picchi di carico che comporterebbero transitori veloci, il che permette un downsizing molto spinto del gruppo termico. Nel caso in cui invece fosse possibile fornire con la macchina termica più potenza di quanto non sia richiesta dalla missione, si cercherà comunque di far lavorare il motore a punto circa fisso utilizzando il surplus di potenza per ricaricare la batteria e poter utilizzare quella energia per il compimento di un'altro eventuale circuito urbano. In questo modo è possibile utilizzare il motore termico per lo più su rendimenti molto elevati e mantenere comunque un buon livello dello SOC per poter percorrere tratti urbani senza dover necessariamente ricaricare in plug-in la batteria.[25]

4.4.2 Logica di Controllo Serie B

Analoghe considerazioni possono essere fatte per i modi di funzionamento della architettura in serie di tipo B. Anche in questo caso la logica cerca di far lavorare il motore a punto circa fisso o comunque lungo la sua economic line utilizzando il surplus per la carica della batteria e colmando i picchi di potenza richiedendo potenza elettrica. La differenza sta però nel fatto che il generatore in questo caso può funzionare sia da motore che da generatore, quindi può richiedere o dare potenza alla batteria.

Questo complica leggermente la logica di controllo, come mostrato in Fig. 4.17 in quanto, pur mantenendo costante rispetto al tipo A il numero fisico di componenti, aggiunge di fatto un componente dal punto di vista del funzionamento.

4.4.3 Logica di Controllo Serie C

Nell'ultima configurazione di architettura in serie restano invariate tutte le considerazioni fatte per quanto riguarda il BMS del tipo B, eccezion fatta per il fatto che questa volta il numero di componenti che costituiscono il sistema è cambiato non solo dal punto di vista del funzionamento ma fisico. Di per sé però questo non introduce grosse differenze rispetto alla logica precedente se non per il fatto che invece di controllare in modo duale il generatore abbiamo una divisione netta tra componenti che richiedono, e componenti che forniscono energia.

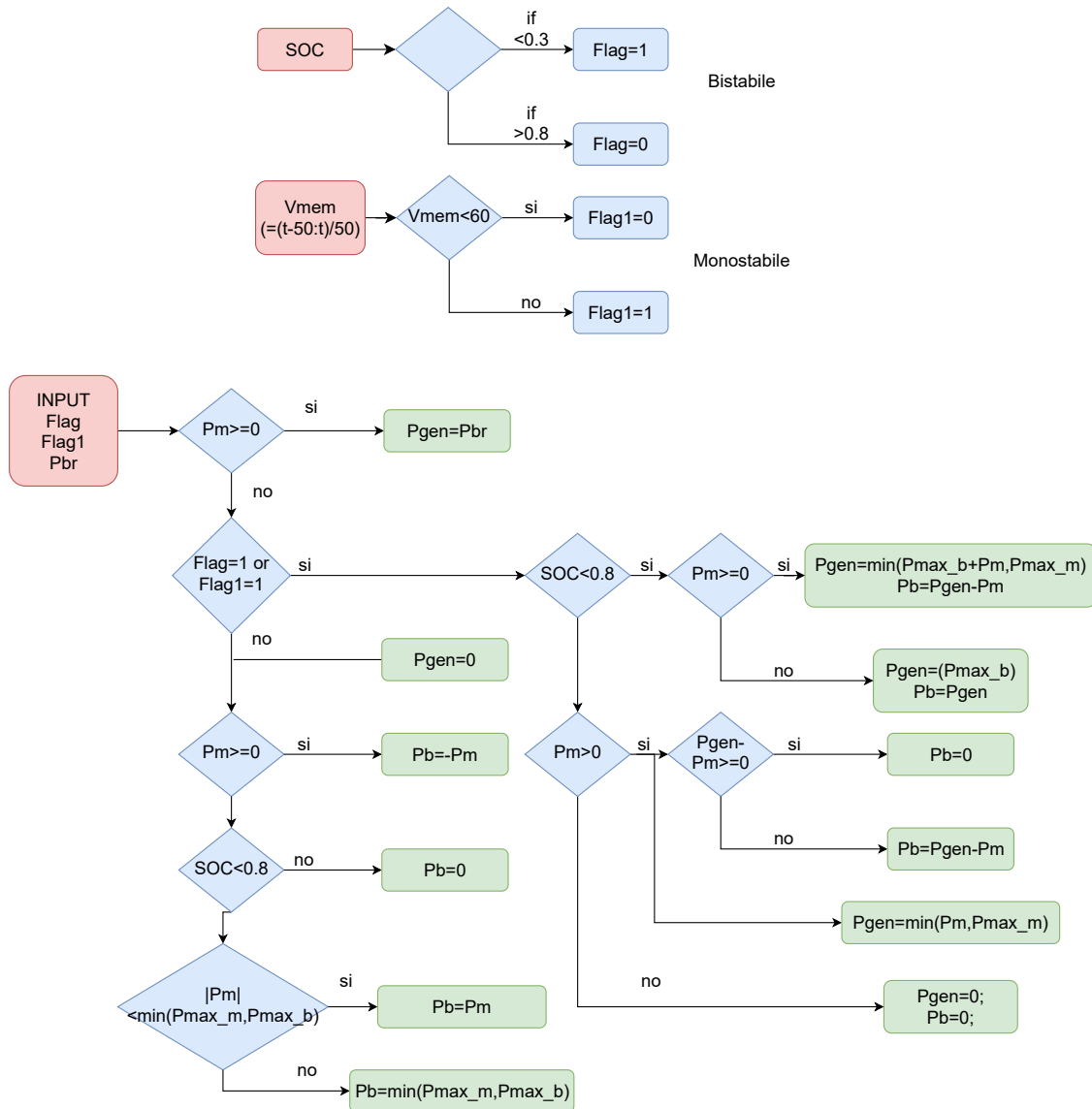


Figura 4.17. Schema Logico per Serie B.

4.4.4 Logica di Controllo Parallelo

La logica di controllo che comanda l'architettura in parallelo è invece diversa in sostanza dalle precedenti. In questo caso infatti non è possibile obbligare il motore termico ad un regime di rotazione e coppia qualunque, ma siamo vincolati dal collegamento diretto del motore sull'asse della trasmissione. Questo non impedisce di cercare di far lavorare il motore termico a potenza circa costante come fatto per le architetture in serie, ma non è possibile prescindere

dal fatto che se la velocità di rotazione ha un determinato valore allora a parità di potenza la coppia dovrà essere maggiore.[26] Questo comporta una minore possibilità di downsizing per quanto riguarda la macchina termica ed una riduzione in termini di rendimento. Non è quindi possibile utilizzare una economic line sulla quale far cambiare i punti di funzionamento del motore termico. La batteria verrà comunque chiamata dal sistema in caso di picchi di coppia come nei casi precedenti ma a differenza delle architetture in serie in molti casi sarà difficile generare un surplus a bassi regimi di rotazione.[27]

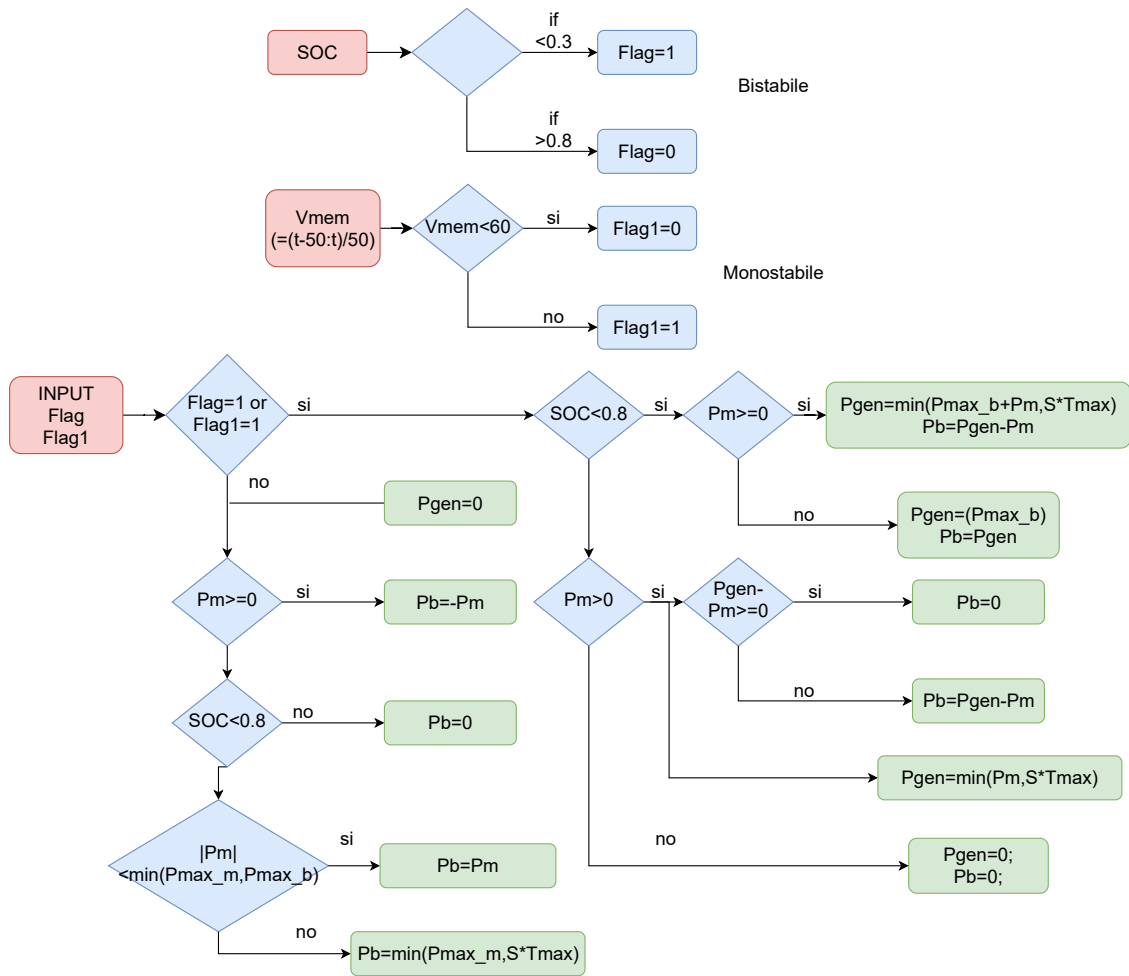


Figura 4.18. Schema Logico per Parallelo.

Il sistema deve quindi bilanciare le richieste e i surplus di potenza anche in virtù della velocità di rotazione del motore, come mostrato in Fig. 4.18.

Capitolo 5

Risultati e Commenti

Una volta analizzati tutti i modelli numerici utilizzati per descrivere il comportamento dei vari elementi costitutivi del sistema, e avendo definito un profilo di missione che tenga conto delle principali esigenze del veicolo (ed in generale di veicoli appartenenti alla stessa categoria), è possibile utilizzare il software di simulazione Simulink per determinare i comportamenti delle differenti architetture in rapporto al target definito. Simulink infatti permette di collegare i blocchi che costituiscono i componenti del veicolo, mettendoli in comunicazione tra loro. Ogni blocco quindi riceverà degli input dal blocco che lo precede logicamente per restituire degli output che saranno poi gli input del successivo blocco logico. In questo modo è possibile far risalire le condizioni operative ipotizzate lungo la catena di elementi che modellizzano il veicolo per ottenere in uscita i consumi in termini di energia dei differenti sistemi propulsivi.

Parametri	Serie A	Serie B	Serie C	Parallelo
Energia missione [kWh]	26.5	26.5	26.5	26.5
Energia Rigenerata [kWh]	6.38	6.38	6.38	6.38
Energia Elettrica [kWh]	19.8	19.2	19.2	17.3
Carburante [L]	4.34	4.34	4.34	5.87
SOC Finale [%]	61.7	63.9	63.6	68.8

Tabella 5.1. Confronto dei Risultati per le diverse Architetture.

Osservando i risultati ottenuti in Tab. 5.1 è possibile constatare come questi siano coerenti con le osservazioni fatte in precedenza sulle varie

architetture. Infatti si nota come i valori di energia utilizzata per il compimento della missione siano leggermente inferiori per le strutture di tipo B e C piuttosto che per la struttura di tipo A. Questo perchè pur essendo la più semplice dal punto di vista realizzativo, l'architettura in serie A non riesce a far lavorare correttamente il motore elettrico nei punti di funzionamento competenti alla movimentazione del braccio. L'architettura di tipo serie B non è invece influenzata dal doppio rendimento dovuto al motore elettrico della trazione e a quello del generatore. Per quanto riguarda invece l'architettura di tipo serie C, è la più complessa dal punto di vista strutturale in quanto presenta due motori elettrici al posto di uno singolo, ma, proprio per questa sua caratteristica, permette di scegliere la taglia del motore elettrico in modo da ottimizzarne il rendimento nei punti di lavoro della missione del braccio. L'architettura in parallelo, per quanto detto in precedenza riguardo la ridotta possibilità di downsizing e l'impossibilità di svincolare la rotazione del motore da quella dell'asse delle ruote, risulta avere un utilizzo della batteria più ridotto ed una maggiore componente energetica attribuibile alla parte termica del sistema propulsivo.

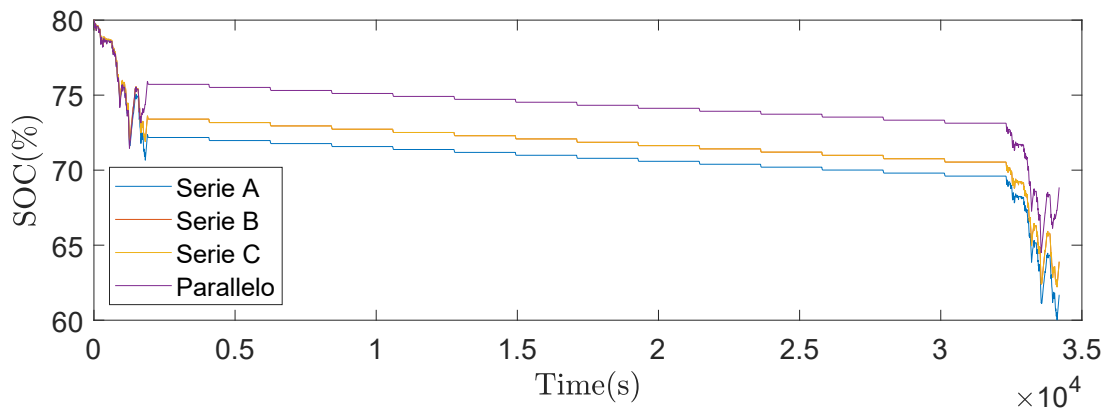


Figura 5.1. Andamento dello SOC per Batteria da 40 kWh.

Sempre analizzando i risultati ottenuti è possibile notare come lo SOC delle batterie in tutti i casi presi in esame, non scenda mai al di sotto del 60%. Ha quindi senso provare a sostituire la batteria da 40 kWh con un'altra batteria avente la medesima tensione nominale ma con una capacità dimezzata, quindi di 20 kWh. Si può vedere in Fig. 5.2 che la nuova taglia scelta

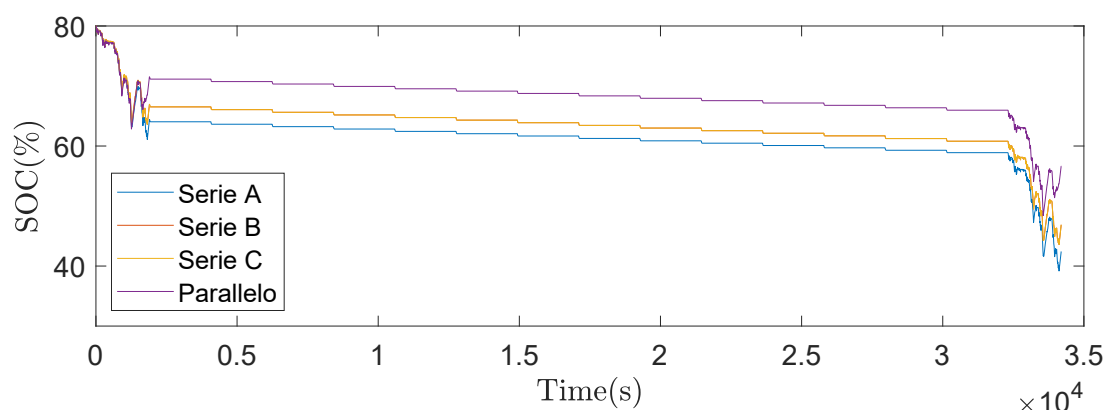


Figura 5.2. Andamento dello SOC per Batteria da 20 kWh.

per la batteria non comporta mai uno SOC al di sotto del %30 che è il valore minimo consigliato per un utilizzo corretto e longevo della batteria. La missione è dunque in grado di essere svolta nella sua completezza anche con un pacco batteria ridotto riuscendo a coprire le zone urbane in solo elettrico. Alla luce di questi risultati è possibile evincere come la configurazione più conveniente dal punto di vista energetico sia l'architettura in serie di tipo C. Anche tenendo conto della sua maggiore complessità strutturale risulta la configurazione migliore, poichè la presenza di due motori non crea particolari problemi dal punto di vista progettuale. Molti produttori infatti forniscono la centralina idraulica completa di pompa e motore, il che permette di considerare il sistema come una black box già completamente funzionante. In ottica di sviluppo futuro è possibile utilizzare questi e modelli e le simulazione da esse derivate per altri veicoli di questo genere, andando poi magari ad utilizzare diverse missioni sia per quanto riguarda la parte del tragitto, per esempio con altri circuiti di omologazione, sia per quanto riguarda la movimentazione del braccio, andando a cambiare le percentuali di lavoro di sollevamento sul tempo di lavoro totale, aumentando quindi il numero di alzate.

Elenco dei simboli

Acronimi

<i>BMS</i>	Battery Management System
<i>BSFC</i>	Brake-Specific Fuel Consumption
<i>EC</i>	European Commision
<i>EM</i>	Electric Motor
<i>HPU</i>	Hydraulic Power Unit
<i>ICE</i>	Internal Combustion Engine
<i>LEZ</i>	Low Emission Zone
<i>NAPCP</i>	National Air Pollution Control Programme
<i>SOC</i>	State of Charge
<i>SOE</i>	State of Energy
<i>ULEZ</i>	Ultra Low Emission Zone
<i>ZTL</i>	Zona Traffico Limitato

Lettere Greche

η_{hm}	Rendimento Idraulico-Meccanico
η_v	Rendimento Totale
η_v	Rendimento Volumetrico
μ_v	Coefficiente di Attrito Asfalto-Pneumatico

ϕ Angolo di Attrito

ρ_{aria} Densità aria

Lettere Romane

C_{Cell} Capacità Nominale Cella

C_{tot} Capacità Nominale Batteria

C_x Coefficiente di Resistenza Aerodinamica

g Accelerazione di Gravità

I Corrente Batteria

M_t Massa Veicolo

N_p Numero di Celle in Parallelo

N_s Numero di Celle in Serie

P_{all} Potenza Necessaria all'allungamento del Braccio

p_{loss} Perdita di Pressione

P_{rot} Potenza Necessaria alla Rotazione del Braccio

q Portata

R_{batt} Resistenza Interna Batteria

T_{cell} Tensione Cella

T_{nom} Tensione Nominale

V_{batt} Tensione Batteria

V_{oc} Tensione di Circuito Aperto

Listati

Profili Alzata

```
1 clear all;
   clc;
3 close all;
   set(0,'defaulttextinterpreter','latex')
5
   %Dati
7 Tmax=28800;
   n=14;           %max 475
9 x_punto=0.5;
   x_2punti=0.5;
11 teta_start=-0.523;
   Lb=4;
13 h0=3;
   Ht=10;
15 Dt=7;
   Rp=0.1;
17 f_a=0;3;
   %Geometria0
19 teta_target=atan(Ht/Dt);
   h_noall=Lb*sin(teta_target);
21 h_lin_max=Ht-h_noall;
   all_max=h_lin_max/sin(teta_target);
23
   %Calcolo velocit\ a' e accelerazione angolari
25 teta2p=x_2punti/Lb;
   tetap_max=x_punto/Lb;
27 %Tempi e spazi transitori
   t_tetap_max=tetap_max/teta2p;
29 teta_tetap_max=0.5*t_tetap_max^2*teta2p;
   teta_tetap_cost=teta_target-teta_start-(2*teta_tetap_max);
31 t_tetap_cost=teta_tetap_cost/tetap_max;
   t_v_max=x_punto/x_2punti;
33 x_v_max=0.5*t_v_max^2*x_2punti;
   x_v_cost=all_max-2*x_v_max;
35 t_v_cost=x_v_cost/x_punto;

37 t=[t_tetap_max t_tetap_cost t_v_max t_v_cost];

39 % 1=transitorio_rotazione
   % 2=rotazione_costante
41 % 3=transitorio_allungamento
```

```

% 4=allungamento costante
43 a=[teta2p x_2punti];
    v=[tetap_max x_punto];
45 f=1001;
    T_alzata=2*t(1)+t(2)+2*t(3)+t(4);
47 TT=linspace(0,T_alzata,f);
    Te=zeros(1,f);
49 Te(1)=teta_start;
    Tep=zeros(1,f);
51 Te2p=zeros(1,f);
    AA=zeros(1,f);
53 XX=zeros(1,f);
    VV=zeros(1,f);
55 HH=zeros(1,f);
    HH(1)=h0+sin(teta_start)*Lb;
57 t_step=TT(2)-TT(1);
    for i=2:f
59     if TT(i)>=0 && TT(i)<=t(1)
        [Te(i),Tep(i)]=E(a(1),Tep(i-1),Te(i-1),t_step);
61         HH(i)=sin(Te(i))*Lb+h0;
        Te2p(i)=a(1);
63         AA(i)=0;
        elseif TT(i)>t(1) && TT(i)<t(1)+t(2)
65         [Te(i),Tep(i)]=E(0,Tep(i-1),Te(i-1),t_step);
        HH(i)=sin(Te(i))*Lb+h0;
67         Te2p(i)=0;
        AA(i)=0;
69         elseif TT(i)>=t(1)+t(2) && TT(i)<t(1)+t(2)+t(1)
        [Te(i),Tep(i)]=E(-a(1),Tep(i-1),Te(i-1),t_step);
71         HH(i)=sin(Te(i))*Lb+h0;
        HH0=max(HH);
73         Te2p(i)=-a(1);
        AA(i)=0;
75         elseif TT(i)>=t(1)+t(2)+t(1) && TT(i)<t(1)+t(2)+t(1)+t(3)
        [XX(i),VV(i)]=E(a(2),VV(i-1),XX(i-1),t_step);
77         HH(i)=HH0+XX(i)*sin(teta_target);
        Te(i)=Te(i-1);
79         Te2p(i)=0;
        AA(i)=a(2);
81         elseif TT(i)>=t(1)+t(2)+t(1)+t(3) && TT(i)<t(1)+t(2)+t(1)+t(3)+t(4)
        [XX(i),VV(i)]=E(0,VV(i-1),XX(i-1),t_step);
83         HH(i)=HH0+XX(i)*sin(teta_target);
        Te(i)=Te(i-1);
85         Te2p(i)=0;
        AA(i)=0;
87         elseif TT(i)>=t(1)+t(2)+t(1)+t(3)+t(4) && TT(i)<=...
...t(1)+t(2)+t(1)+t(3)+t(4)+t(3)
89         [XX(i),VV(i)]=E(-a(2),VV(i-1),XX(i-1),t_step);
        HH(i)=HH0+XX(i)*sin(teta_target);
91         Te(i)=Te(i-1);
        Te2p(i)=0;
93         AA(i)=-a(2);
        end
95     end
    To=(Tmax/(n*2))-T_alzata;
97    To_index=floor(To/t_step);
    %Tempo
99    TT=linspace(0,((n-1)*(2*f+2*To_index)+(2*f+2*To_index))*t_step,(n-1)...

```

```

...*(2*f+2*To_index)+(2*f+2*To_index));
101 %Altezza
HH(f+1:f+To_index)=HH(f);
103 HH(f+To_index+1:2*f+To_index)=fliplr(HH(1:f));
HH(2*f+To_index+1:2*f+2*To_index)=1;
105 HH_mod=HH;
for i=1:n-1
107 HH(i*(2*f+2*To_index)+1:i*(2*f+2*To_index)+(2*f+2*To_index))=HH_mod;
end
109 %Teta
Te(f+1:f+To_index)=Te(f);
111 Te(f+To_index+1:2*f+To_index)=fliplr(Te(1:f));
Te(2*f+To_index+1:2*f+2*To_index)=teta_start;
113 Te_mod=Te;
for i=1:n-1
115 Te(i*(2*f+2*To_index)+1:i*(2*f+2*To_index)+(2*f+2*To_index))=Te_mod;
end
117 %teta punto
Tep(f+1:f+To_index)=Tep(f);
119 Tep(f+To_index+1:2*f+To_index)=-fliplr(Tep(1:f));
Tep(2*f+To_index+1:2*f+2*To_index)=0;
121 Tep_mod=Tep;
for i=1:n-1
123 Tep(i*(2*f+2*To_index)+1:i*(2*f+2*To_index)+(2*f+2*To_index))=Tep_mod;
end
125 %teta 2 punti
Te2p(f+1:f+To_index)=Te2p(f);
127 Te2p(f+To_index+1:2*f+To_index)=-fliplr(Te2p(1:f));
Te2p(2*f+To_index+1:2*f+2*To_index)=0;
129 Te2p_mod=Te2p;
for i=1:n-1
131 Te2p(i*(2*f+2*To_index)+1:i*(2*f+2*To_index)+(2*f+2*To_index))=Te2p_mod;
end
133 %allungamento
XX(f+1:f+To_index)=XX(f);
135 XX(f+To_index+1:2*f+To_index)=fliplr(XX(1:f));
XX(2*f+To_index+1:2*f+2*To_index)=0;
137 XX_mod=XX;
for i=1:n-1
139 XX(i*(2*f+2*To_index)+1:i*(2*f+2*To_index)+(2*f+2*To_index))=XX_mod;
end
141 %velocita' lineare
VV(f+1:f+To_index)=VV(f);
143 VV(f+To_index+1:2*f+To_index)=-fliplr(VV(1:f));
VV(2*f+To_index+1:2*f+2*To_index)=0;
145 VV_mod=VV;
for i=1:n-1
147 VV(i*(2*f+2*To_index)+1:i*(2*f+2*To_index)+(2*f+2*To_index))=VV_mod;
end
149
%accelerazione lineare
151 AA(f+1:f+To_index)=AA(f);
AA(f+To_index+1:2*f+To_index)=-fliplr(AA(1:f));
153 AA(2*f+To_index+1:2*f+2*To_index)=0;
AA_mod=AA;
155 for i=1:n-1
AA(i*(2*f+2*To_index)+1:i*(2*f+2*To_index)+(2*f+2*To_index))=AA_mod;
157 end

```

```

159 figure (1)
    plot(TT',HH','LineWidth',2);
161 xlim([0 2055])
    xlabel('Time(s)')
163 ylabel('Altezza(m)')
    set(gca,'FontSize',20)
165 figure (2)
    plot(TT',Te','LineWidth',2);
167 xlim([0 2055])
    ylim([-0.6 1])
169 xlabel('Time(s)')
    ylabel('Teta(rad)')
171 set(gca,'FontSize',20)
    figure (3)
173 plot(TT',Tep');
    xlim([0 2055])
175 ylim([-1 1])
    figure (4)
177 plot(TT',Te2p');
    xlim([0 2055])
179 figure (5)
    plot(TT',AA');
181 xlim([0 2055])
    variable=[Te;Tep;Te2p;XX;VV;AA;HH];
183 simin = timeseries(variable',TT');

185 %Grafici

187 f1=figure(1);
    set(f1,'Position',[0 0 570 410]);
189 set(f1,'PaperSize',[15 11]); %set the paper size to what you want
    print(f1,'Hprofile','-dpdf')
191 f2=figure(2);
    set(f2,'Position',[0 0 570 410]);
193 set(f2,'PaperSize',[15 11]); %set the paper size to what you want
    print(f2,'Tprofile','-dpdf')

195
    save Profile -v7.3 simin

197

199
    %Funzioni
201 function[x,v]=E(a,v0,x0,t)
    v=a*t+v0;
203 x=0.5*a*t^2+v0*t+x0;
    end

```

Logica di Controllo Serie A

```

function [Pb,Pgen,T,S,flag,v_mem,eff,Prig,Pmax_b] =...
2 ...LCV(Pm,SOCe,Bdata,Vsoc_e,flag,v,v_mem,eff_max,S_1)
    Cr_charge=0.8;
4    Cr_discharge=3;

```

```

C_tot=Bdata(1);
6  %memoria di v
v_mem(1:49)=v_mem(2:50);
8  v_mem(50)=v;

10 SOCc=SOce;
Pmax_m=75000;
12 Imax=C_tot*Cr_charge;
Pmax_b=Imax*Vsoc_e;
14 v_m=mean(v_mem);
Prig=0;
16 %Flag on v (Monostabile)
if v_m<60
18     flag1=0;
else
20     flag1=1;
end
22
%Flag on SOC (Bistabile)
24 if SOCc<0.3
    flag=1;
26 elseif SOCc>=0.8
    flag=0;
28 end

30 %if Pgen on/off
if (flag==1 || flag1==1) && SOCc<0.8
32     if Pm>=0
        Pgen=min(Pmax_b+Pm,Pmax_m);
34         Pb=Pgen-Pm;
    else
36         Pgen=Pmax_b;
        Pb=Pgen;
38     end
elseif (flag==1 || flag1==1) && SOCc>=0.8
40     if Pm>0
        Pgen=min(Pm,Pmax_m);
42         if Pgen-Pm>=0
            Pb=0;
44         else
            Pb=Pgen-Pm;
46         end
    else
48         Pgen=0;
        Pb=0;
50     end
else
52     Pgen=0;
    %regenerative brake
54     if Pm>=0
        Pb=-Pm;
56     elseif Pm<0 && abs(Pm)<min(Pmax_m,Pmax_b) &&SOCc<0.8
        Pb=-Pm;
58         Prig=Pb;
    elseif Pm<0 && abs(Pm)>=min(Pmax_m,Pmax_b) &&SOCc<0.8
60         Pb=min(Pmax_m,Pmax_b);
        Prig=Pb;
62     else

```

```

        Pb=0;
64     end
    end
66
68
70     S=0;
    T=0;
    eff=0;
72
74     for l=1:91
        if abs(Pgen-(eff_max(1,1)*1000*eff_max(1,5)))<=(eff_max(2,1)...
76     ...-eff_max(1,1))*1000/2
            if eff_max(1,3)*1.5-S_1<=4000
78                 S=eff_max(1,3)*1.5;
                T=eff_max(1,4)/1.5;
80                 eff=eff_max(1,2);
            else
82                 S=S_1+2000;
                T=eff_max(1,4)/1.5;
84                 eff=eff_max(1,2);
            end
86     end
    end
88     end

```

Logica di Controllo Serie B

```

function [Pb,Pgen,T,S,flag,v_mem,eff,Prig,Clutch,ICE,pol]=...
2 ...LCV_B(Pm,SOCe,Bdata,Vsoc_e,flag,v,v_mem,eff_max,S_1,Sc,Tc,Pc)
Cr_charge=0.8;
4 Cr_discharge=3;
C_tot=Bdata(1);
6 %memoria di v
v_mem(1:49)=v_mem(2:50);
8 v_mem(50)=v;

10 SOCc=SOCe;
Pmax_m=75000;
12 Imax=C_tot*Cr_charge;
Pmax_b=Imax*Vsoc_e;
14 v_m=mean(v_mem);
Prig=0;
16 %Flag on v (Monostabile)
if v_m<60
18     flag1=0;
else
20     flag1=1;
end
22
%Flag on SOC (Bistabile)
24 if SOCc<0.3
    flag=1;

```

```

26 elseif SOCc>=0.8
    flag=0;
28 end

30 %if Pgen on/off
if (flag==1 || flag1==1) && SOCc<0.8
32     if Pm>=0
        Pgen=min(Pmax_b+Pm,Pmax_m);
34         Pb=Pgen-Pm;
    else
36         Pgen=(Pmax_b);
        Pb=Pgen;
38     end
elseif (flag==1 || flag1==1) && SOCc>=0.8
40     if Pm>0
        Pgen=min(Pm,Pmax_m);
42         if Pgen-Pm>=0
            Pb=0;
44         else
            Pb=Pgen-Pm;
46         end
    else
48         Pgen=0;
        Pb=0;
50     end
else
52     Pgen=0;
    %regenerative brake
54     if Pm>=0
        Pb=-Pm;
56     elseif Pm<0 && abs(Pm)<min(Pmax_m,Pmax_b) &&SOCc<0.8
        Pb=-Pm;
58         Prig=Pb;
    elseif Pm<0 && abs(Pm)>=min(Pmax_m,Pmax_b) &&SOCc<0.8
60         Pb=min(Pmax_m,Pmax_b);
        Prig=Pb;
62     else
        Pb=0;
64     end
end
66

68
70 S=0;
T=0;
eff=0;
72 pol=0;
Clutch=1;
74 ICE=1;

76
for l=1:91
78     if abs(Pgen-(eff_max(1,1)*1000*eff_max(1,5)))<=(eff_max(2,1)...
...-eff_max(1,1))*1000/2
80         if eff_max(1,3)*1.5-S_1<=4000
            S=eff_max(1,3)*1.5;
82             T=eff_max(1,4)/1.5;
            eff=eff_max(1,2);

```

```

84         else
85             S=S_1+2000;
86             T=eff_max(1,4)/1.5;
87             eff=eff_max(1,2);
88         end
89     end
90 end
91 if Pc<=0
92     Clutch=1;
93     ICE=1;
94 else
95     if SOCc>=0.3
96         Clutch=0;
97         ICE=0;
98         Pgen=-Pc/0.80;
99         Pb=Pgen;
100        S=Sc;
101        T=Tc;
102    else
103        Clutch=1;
104        ICE=1;
105        Pgen=min(Pmax_m,Pc+Pmax_b);
106        S=Sc;
107        T=Pgen/(Sc*pi/30);
108        pol=1;
109        if Pgen-Pc>=0
110            Pb=Pgen-Pc;
111        else
112            Pb=0;
113        end
114    end
115 end
116 end

```

Logica di Controllo Serie C

```

function [Pb,Pgen,T,S,flag,v_mem,eff,Prig] =...
2 ...LCV_C(Pm,SOCe,Bdata,Vsoc_e,flag,v,v_mem,eff_max,S_1)
Cr_charge=0.8;
4 Cr_discharge=3;
C_tot=Bdata(1);
6 %memoria di v
v_mem(1:49)=v_mem(2:50);
8 v_mem(50)=v;

10 SOCc=SOCe;
Pmax_m=75000;
12 Imax=C_tot*Cr_charge;
Pmax_b=Imax*Vsoc_e;
14 v_m=mean(v_mem);
Prig=0;
16 %Flag on v (Monostabile)
if v_m<60
18     flag1=0;

```

```

else
20     flag1=1;
end
22
%Flag on SOC (Bistabile)
24 if SOCc<0.3
    flag=1;
26 elseif SOCc>=0.8
    flag=0;
28 end

30 %if Pgen on/off
if (flag==1 || flag1==1) && SOCc<0.8
32     if Pm>=0
        Pgen=min(Pmax_b+Pm,Pmax_m);
34         Pb=Pgen-Pm;
    else
36         Pgen=(Pmax_b);
        Pb=Pgen;
38     end
elseif (flag==1 || flag1==1) && SOCc>=0.8
40     if Pm>0
        Pgen=min(Pm,Pmax_m);
42         if Pgen-Pm>=0
            Pb=0;
44         else
            Pb=Pgen-Pm;
46         end
    else
48         Pgen=0;
        Pb=0;
50     end
else
52     Pgen=0;
    %regenerative brake
54     if Pm>=0
        Pb=-Pm;
56     elseif Pm<0 && abs(Pm)<min(Pmax_m,Pmax_b) &&SOCc<0.8
        Pb=-Pm;
58         Prig=Pb;
    elseif Pm<0 && abs(Pm)>=min(Pmax_m,Pmax_b) &&SOCc<0.8
60         Pb=min(Pmax_m,Pmax_b);
        Prig=Pb;
62     else
        Pb=0;
64     end
end
66

68
S=0;
70 T=0;
eff=0;
72

74 for l=1:91
    if abs(Pgen-(eff_max(1,1)*1000*eff_max(1,5)))<=(eff_max(2,1)...
76 ...-eff_max(1,1))*1000/2

```

```

            if eff_max(1,3)*1.5-S_1<=4000
78         S=eff_max(1,3)*1.5;
            T=eff_max(1,4)/1.5;
80         eff=eff_max(1,2);
            else
82         S=S_1+2000;
            T=eff_max(1,4)/1.5;
84         eff=eff_max(1,2);
            end
86     end
end
88 end

```

Logica di Controllo Parallelo

```

1  function [Pb,Pgen,Tm,Sm,flag,v_mem,Prig,Pmax_b,Sem,Tem] =...
...LCV_par(Pm,SOCe,Bdata,Vsoc_e,flag,v,v_mem,S)
3  Cr_charge=0.8;
   Cr_discharge=3;
5  C_tot=Bdata(1);
   %memoria di v
7  v_mem(1:49)=v_mem(2:50);
   v_mem(50)=v;
9
   SOCc=SOCe;
11  Tmax=380;
   Pmax_m=Tmax*(S*pi/30);
13  Imax=C_tot*Cr_charge;
   Pmax_b=Imax*Vsoc_e;
15  v_m=mean(v_mem);
   Prig=0;
17  %Flag on v (Monostabile)
   if v_m<60
19       flag1=0;
   else
21       flag1=1;
   end
23
   %Flag on SOC (Bistabile)
25  if SOCc<0.3
       flag=1;
27  elseif SOCc>=0.8
       flag=0;
29  end

31  %if Pgen on/off
   if (flag==1 || flag1==1) && SOCc<0.8
33       if Pm>=0
           Pgen=min(Pmax_b+Pm,Pmax_m);
35       Pb=Pgen-Pm;
       else
37       Pgen=Pmax_b;
           Pb=Pgen;
39       end

```

```

elseif (flag==1 || flag1==1) && SOCc>=0.8
41     if Pm>0
        Pgen=min(Pm,Pmax_m);
43         if Pgen-Pm>=0
            Pb=0;
45         else
            Pb=Pgen-Pm;
47         end
        else
49             Pgen=0;
            Pb=0;
51         end
    else
53         Pgen=0;
        %regenerative brake
55         if Pm>=0
            Pb=-Pm;
57         elseif Pm<0 && abs(Pm)<min(Pmax_m,Pmax_b) &&SOCc<0.8
            Pb=-Pm;
59             Prig=Pb;
            elseif Pm<0 && abs(Pm)>=min(Pmax_m,Pmax_b) &&SOCc<0.8
61                 Pb=min(Pmax_m,Pmax_b);
                    Prig=Pb;
63             else
                Pb=0;
65             end
        end
67     if Pgen>0
        Sm=S;
69         Tm=Pgen/(S*pi/30);
71     else
        Sm=0;
73         Tm=0;
        end
75     Sem=S;
77     Tem=Pb/(Sem*pi/30);
79
end

```

Bibliografia

- [1] Reşitoğlu İ. A., Altinişik K., Keskin A., "The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems." *Clean Technologies and Environmental Policy* 17.1, (2015), p. 15-27.
- [2] Fiebig M., Wiartalla A., Holderbaum B., Kiesow S. , in "Particulate emissions from diesel engines: correlation between engine technology and emissions." *Journal of Occupational Medicine and Toxicology* 9.1, (2014),p. 1-18.
- [3] Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants.
- [4] Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants.
- [5] Regulation (EC) No 2003/2003 of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 relating to fertilisers (Text with EEA relevance).
- [6] F. Mocera, A. Somà in "Analysis of a Parallel Hybrid Electric Tractor for Agricultural Applications." *Energies* 13.12, (2020), 3055.
- [7] Yo B., Qiao M., Xu J., Liu D., in "Low-Speed Control of Heavy-Load Transfer Robot with Long Telescopic Boom Based on Stribeck Friction Model." *Mathematical Problems in Engineering* 2012, (2012).
- [8] Du W., Wu P., Wu X., Ma B., in "Combined motion design and control of multi-stage Flexible telescopic boom model." *2016 2nd International Conference on Architectural, Civil and Hydraulics Engineering (ICACHE 2016).*, (2016), p. 263-271 .
- [9] Shen R., Zhang X., Zhou C., in "Dynamic simulation of the harvester boom cylinder." *Machines* 5.2, (2017), 13.
- [10] Somà A., Bruzzese F., Mocera F., Viglietti E., in "Hybridization factor and performance of hybrid electric telehandler vehicle." *IEEE*

- Transactions on Industry Applications* 52.6, (2016), p. 5130-5138.
- [11] Wang T., Wang Q., in "Efficiency analysis and evaluation of energy-saving pressure-compensated circuit for hybrid hydraulic excavator." , *Automation in construction*, 47, (2014), p. 62-68.
- [12] Bayindir K. Ç., Gözüküçük M. A., Teke A., in "A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units." *Energy conversion and Management* 52.2,(2011), p. 1305-1313.
- [13] Somà A., in "Hybrid Electric Vehicles", *Trends and hybridization factor for heavy-duty working vehicles*, (2017), p. 3-32.
- [14] Ebbesen S., Elbert P., Guzzella L., in "Engine downsizing and electric hybridization under consideration of cost and drivability." *Oil and Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles* 68.1, (2013), p. 109-116.
- [15] Katrašnik T., in "Hybridization of powertrain and downsizing of IC engine—A way to reduce fuel consumption and pollutant emissions—Part 1." *Energy Conversion and Management* 48.5, (2007), p. 1411-1423.
- [16] Xu X., Wu X., Jordan M., Dong P., Liu Y., in "Coordinated engine-start control of single-motor P2 hybrid electric vehicles with respect to different driving situations." *Energies* 11.1, (2018), 207.
- [17] Mayrink S., Oliveira J. G., Dias B. H., Oliveira L. W., Ochoa J. S., Rosseti G. S., in "Regenerative Braking for Energy Recovering in Diesel-Electric Freight Trains: A Technical and Economic Evaluation." *Energies* 13.4, (2020), 963.
- [18] Yabe T., Akatsu K., Okui N., Niikuni T., Kawai T., in "Efficiency improvement of regenerative energy for an EV." *World Electric Vehicle Journal* 5.2, (2012), p. 494-500.
- [19] Miao Y., Hynan P., Von Jouanne A., Yokochi A., in "Current Li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements." *Energies* 12.6, (2019), 1074.
- [20] Zhang R., Xia B., Li B., Cao L., Lai Y., Zheng W., Wang W., in "State of the art of lithium-ion battery SOC estimation for electrical vehicles." *Energies* 11.7, (2018), 1820.
- [21] Horiba T., Maeshima T., Matsumura T., Koseki M., Arai J., Muranaka Y., in "Applications of high power density lithium ion batteries.", *Journal of Power Sources*, 146.1-2, (2005), p. 107-110.
- [22] Hickey R., Jahns T. M., in "Direct comparison of state-of-charge and state-of-energy metrics for li-ion battery energy storage." *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, (2019), p. 2466-2470

- [23] Hu Y., Yurkovich S., Guezennec Y., Yurkovich B. J., in "Electro-thermal battery model identification for automotive applications." *Journal of Power Sources* 196.1, (2011), p. 449-457.
- [24] Zhang R., Xia B., Li B., Cao L., Lai Y., Zheng W., Wang M., in "A study on the open circuit voltage and state of charge characterization of high capacity lithium-ion battery under different temperature." *Energies* 11.9, (2018), p. 2408.
- [25] Yoo H., Sul S. K., Park Y., Jeong J., in "System integration and power-flow management for a series hybrid electric vehicle using supercapacitors and batteries." *IEEE Transactions on Industry Applications* 44.1, (2008), p. 108-114.
- [26] Solouk A., Shahbakhti M., in "Energy optimization and fuel economy investigation of a series hybrid electric vehicle integrated with diesel/RCCI engines." *Energies* 9.12, (2016), 1020.
- [27] Adel B., Zhang Y., Sun S. "Parallel HEV hybrid controller modeling for power management." *World Electric Vehicle Journal* 4.1, (2010), p. 190-196.