

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale,
dell'Autoveicolo e della Produzione

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

Veicoli ibridi elettrici: modelli numerici e confronto tra diverse architetture



Relatori

prof. Enrico Galvagno
prof. Alessandro Vigliani
prof. Mauro Velardocchia

Candidato

Valerio Tinelli

ANNO ACCADEMICO 2017/ 2018

*C'è una forza motrice più forte
del vapore, dell'elettricità
e dell'energia atomica: la volontà.*

Cit. Albert Einstein

6 Aprile 2018

Sommario

Introduzione	1
<i>Struttura della Tesi</i>	2
1 CAPITOLO: INTRODUZIONE E CLASSIFICAZIONE DEI VEICOLI IBRIDI ELETTRICI .	3
1.1 IBRIDO SERIE	5
1.1.1 Modi di funzionamento	6
1.2 IBRIDO PARALLELO	7
1.2.1 Modi di funzionamento	8
1.3 IBRIDO SERIE-PARALLELO EVT	9
1.3.1 Modi di funzionamento EVT 1 mode.....	10
1.3.2 Power Split Device.....	11
1.3.3 Veicoli ibridi elettrici complessi con architettura EVT 2 mode	13
1.4 CICLI DI OMOLOGAZIONE	14
2 CAPITOLO: LIBRERIE PRINCIPALI	16
2.1 LIBRERIE UTILIZZATE	16
2.1.1 Hybrid Optimization Tool	17
2.1.2 Longitudinal dynamic vehicle	23
2.1.3 Driver.....	27
2.1.4 Profile mission and environment data	28
2.1.5 ICE (Internal Combustion Engine).....	29
2.1.6 ECU (Engine Control Unit).....	29
2.1.7 Electric Motor / Generator.....	31
2.1.8 Battery	34
2.1.9 Power Split Device.....	36
3 CAPITOLO : VEICOLO IBRIDO ELETTRICO SERIE o VEICOLO ELETTRICO CON RANGE EXTENDER.....	37
3.1 Ottimizzazione attraverso Hybrid optimization tool	37
3.2 Analisi con diverse metriche di driveability.....	49
3.2.1 Analisi sulla penalità, veicolo munito di cambio di velocità.....	49
3.2.2 Analisi su ciclo WLTC ridotto	54
3.2.3 Analisi veicolo con ICE in downsizing e inserimento plug-in	54
3.3 Simulazione e ottimizzazione del veicolo su strada	56
3.3.1 VCU-SH.....	58
3.3.2 Risultati simulazione	61
4 CAPITOLO : VEICOLO IBRIDO ELETTRICO PARALLELO P2	71
4.1 Ottimizzazione attraverso Hybrid optimization tool	71
4.1.1 Analisi con diverse metriche di driveability.....	80
4.1.2 Analisi su ciclo WLTC ridotto	84
4.2 Simulazione e ottimizzazione del veicolo su strada	85
4.2.1 ECMS	86

4.2.2	Risultati simulazione su strada	92
4.2.3	Analisi sul cambio marcia e miglioramento del comfort	100
5	CAPITOLO: VEICOLO IBRIDO ELETTRICO SERIE PARELLEO EVT 1 MODE	103
5.1	Analisi accelerazione continua e costante fino alla velocità di 200 [km/h] e permanenza partendo da uno stato di carica del 65 [%].....	108
5.2	Analisi accelerazione continua e costante fino alla velocità di 200 [km/h] e permanenza partendo da uno stato di carica del 90 [%].....	117
5.3	Accelerazione repentina da 50 [km/h] alla velocità di 90 [km/h], manovra sorpasso di emergenza su strada suburbana.....	118
5.4	Analisi su ciclo NEDC tratto extraurbano, con stato di carica pari al 65[%] e 40 [%]	121
5.5	Analisi su ciclo NEDC tratto urbano, con stato di carica pari al 65[%] e 40[%]	124
5.6	Analisi consumo di carburante su ciclo WLTC e WLTC ridotto.....	128
6	CAPITOLO: VEICOLO IBRIDO ELETTRICO SERIE PARELLEO EVT 2 MODE	130
6.1	Modalità Pura Elettrica.....	133
6.1.1	Analisi cinematica	134
6.1.2	Analisi statica	135
6.1.3	Logica di controllo	136
6.1.4	Risultati simulazione	138
6.2	Modalità EVT Input Split.....	140
6.2.1	Analisi cinematica	140
6.2.2	Analisi statica	141
6.2.3	Logica di controllo	142
6.2.4	Risultati simulazione	144
6.3	Modalità Compund Split	153
6.3.1	Analisi cinematica	153
6.3.2	Analisi statica	154
6.3.3	Logica di controllo	155
6.3.4	Risultati simulazione	156
	CONCLUSIONI.....	162
	BIBLIOGRAFIA.....	164
	RINGRAZIAMENTI	167

Introduzione

L'ultimo secolo, ad eccezione degli anni delle due grandi guerre mondiali, è stato caratterizzato da un clima di pace e benessere, sviluppo economico e tecnologico che ha portato un notevole incremento della popolazione. In conseguenza ad una società industrializzata e rivolta al consumismo estremo è stato rilevato anche un aumento brusco del numero dei veicoli circolanti in tutto il mondo. Secondo i dati riportati dal OICA (Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles) e le recenti previsioni il numero dei veicoli proporzionato al numero degli abitanti tenderà a salire. Nella società standardizzata in cui viviamo si sono alternate molte ideologie, tecnologie e le problematiche associate all'approvvigionamento energetico generale hanno raggiunto una dimensione considerevole, specialmente per la particolare distribuzione geografica delle riserve fossili in aree politicamente instabili, per la loro quantità limitata e per il conseguente aumento dell'inquinamento locale e globale.

Gli scenari attesi sono molteplici e a dir poco catastrofici, sia per quanto riguarda l'enorme richiesta di combustibile che andrà ad esaurire le note riserve delle risorse primarie già ampiamente utilizzate con il progresso tecnologico degli ultimi anni del 900, sia per l'allarmante e preoccupante incremento delle emissioni inquinanti e di anidride carbonica che contribuisce al surriscaldamento globale, abbondantemente discusso e studiato negli ultimi anni. Sono molteplici le strade da percorrere nei differenti settori, che spaziano dall'agricoltura, industrie fino ai vari mezzi di trasporto, seppur difficili ma necessarie per attenuare il problema comune.

Per quanto riguarda il sistema di trasporto vi è la necessità di continuare a contenere l'utilizzo di combustibili fossili aumentando l'efficienza dei motori e contenendo le emissioni degli agenti inquinanti con il fine di migliorare la qualità dell'aria nelle zone più popolate.

Ma questo non basta, si è pensato dunque di ritornare a utilizzare i veicoli elettrici, tecnologia già nota negli ultimi anni del 800, ma poi abbandonata con la risoluzione dell'avviamento del motore a combustione interna e per il basso costo del combustibile fossile, riproposta grazie ai grandi passi avanti nell'elettronica e nella meccanica.

Nonostante i veicoli elettrici sembrerebbero la soluzione migliore, dato la capacità di eseguire la propulsione senza produrre direttamente emissioni, sono limitati e penalizzati dalla autonomia delle batterie e dalla mancanza di infrastrutture adatte alla ricarica e soprattutto dal costo ancora molto alto e non proponibile alla classe medio/bassa.

Dunque si è studiato un modo per ovviare alle problematiche e ad oggi la possibile risposta delle principali case automobilistiche è rappresentata dai veicoli ibridi.

I veicoli elettrici ibridi (HEV – Hybrid Electric Vehicle) sono generalmente considerati una soluzione efficace ed intermedia tra i veicoli tradizionali con motore a combustione interna e i veicoli totalmente elettrici. Ad oggi gli HEV sono ampiamente inseriti all'interno del mercato globale, ma rappresentano uno dei punti saldi a cui poter apportare importanti migliorie e dedicare studi di ricerca per cogliere aspetti che possano essere utili per nuove architetture e soluzioni future.

L'utilizzo e l'accoppiamento di motori termici ed elettrici con due sorgenti di energia di diversa natura, permette di abbattere le emissioni inquinanti locali e nei centri urbani, il consumo di combustibile e allo stesso tempo garantire veicoli con prestazioni, facilità di guida e costi in grado di soddisfare le attese di mercato.

Associare al motore termico uno o più motori elettrici, grazie alla loro reversibilità, permettono diversi modi di funzionamento del veicolo. Possono fungere da generatori per la ricarica delle batterie, accumulando energia da poter utilizzare nelle fasi di accelerazione o per piccoli tragitti in modalità esclusivamente elettrica. Si ottiene, dunque, un sistema di trazione ibrida che consente di utilizzare il motore a combustione interna nelle condizioni a rendimento più elevato.

Il lavoro di tesi è focalizzato sull'obiettivo di confrontare e ottimizzare diverse architetture di veicoli ibridi elettrici con l'utilizzo di metodi e algoritmi che permettono una intelligente gestione dell'energia ispirati da criteri per la minimizzazione del consumo di energia (combustibile ed elettricità), dai vincoli dettati dalla driveability e comfort e sul comportamento dei diversi organi di cui il veicolo è composto.

Il lavoro di tesi è stato svolto prevalentemente con il software LMS AMESIM. Sono state create diverse architetture ibride e ottimizzate, si sono svolte simulazioni di guida e effettuate attente analisi riguardanti driveability, stato di carica della batteria, consumo di combustibile, flusso di potenza e comportamento dei motori.

Inoltre sono stati utilizzati fogli di calcolo con i software Matlab/Simulink e Microsoft Excel.

Struttura della Tesi

Il lavoro di tesi è suddiviso in sette capitoli che trattano i seguenti argomenti:

- Capitolo 1: Introduce il concetto di veicolo ibrido e descrive le diverse architetture e le loro particolarità;
- Capitolo 2: Descrizione del software, LMS AMESIM, delle librerie utilizzate per la creazione dei modelli e dei principali sottomodelli utilizzati per l'assemblaggio dei veicoli;
- Capitolo 3: Analisi su modello veicolo ibrido serie o veicolo elettrico con range extender;
- Capitolo 4: Analisi su modello veicolo ibrido parallelo configurazione P2;
- Capitolo 5: Analisi su modello veicolo ibrido serie-parallelo EVT 1 mode;
- Capitolo 6: Analisi su modello veicolo ibrido serie –parallelo EVT 2 mode;
- Conclusioni.

1 CAPITOLO: INTRODUZIONE E CLASSIFICAZIONE DEI VEICOLI IBRIDI ELETTRICI

Viene definito veicolo elettrico ibrido un veicolo in cui l'energia per la propulsione proviene da due sorgenti e almeno una di queste è un accumulatore di energia elettrica. Potrebbe essere definito veicolo ibrido anche un veicolo con due o più motori termici alimentati con un differente combustibile. Il veicolo elettrico ibrido rappresenta un giusto compromesso tra le caratteristiche del motore termico, che trasforma l'energia chimica del combustibile, in energia meccanica con una efficienza accettabile in alcuni punti di funzionamento e il motore elettrico che converte con una maggiore efficienza l'energia elettrica in meccanica. La macchina elettrica è molto versatile e permette di lavorare in trazione e in generazione, questo rappresenta uno dei punti di forza del motore elettrico dato che consente in fase di frenata del veicolo di poter convertire l'energia meccanica in energia elettrica rigenerando la batteria. A differenza di un veicolo elettrico puro, un veicolo elettrico ibrido non necessita di un sistema di ricarica delle batterie esterno, quindi può essere indipendente dalla infrastruttura per la ricarica.

Una prima suddivisione tra i vari veicoli in circolazione è fatta secondo il grado di ibridizzazione (potenza del propulsore elettrico rispetto alla totale potenza installata) e dalla capacità del veicolo di immagazzinare energia elettrica:

- *Micro-Ibridi*: normalmente confusa con la propulsione tradizionale munita di start and stop, caratterizzato da un valore basso di grado di ibridizzazione e con la capacità limitata di start and stop e frenata rigenerativa. Alimentazione a 12-48 [V] e la potenza dei motori elettrici installati a bordo veicolo che in genere non supera i 10 [kW];
- *Mild-Hybrid*: permette una parziale propulsione elettrica, non in grado di percorrere l'intero ciclo guida, possiede anche le caratteristiche del Micro-Ibrido. Si serve di batterie con un voltaggio superiore dai 100-200 [V] e con una potenza dei motori elettrici di circa 20 [kW];
- *Full-Hybrid*: il sistema elettrico permette, a prescindere dalla autonomia delle batterie, di percorrere per intero il ciclo guida. Consente dunque la possibile propulsione elettrica e anche tutte le caratteristiche del Mild-Hybrid. Di solito sono utilizzate batterie con un voltaggio compreso tra 200-300 [V] e una potenza del propulsore elettrico che va anche oltre i 50 [kW].

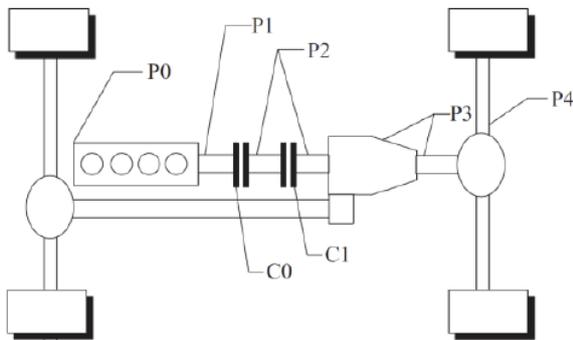
Non vi sono norme vigenti che individuano con precisione le fasce descritte, ad oggi questo tipo di classificazione dunque è discussa ma si tende a tenere in considerazione le caratteristiche riportate.

Un veicolo elettrico ibrido può anche essere plug-in, se a bordo veicolo è inserito un sistema di ricarica della batteria mediante collegamento alla rete elettrica come un veicolo elettrico puro.

I veicoli analizzati possono essere a loro volta classificati in base al numero e posizione della macchina elettrica rispetto al motore termico. Infatti si possono definire in base al numero come:

- Hybrid electric vehicle con singola macchina elettrica (SEM);
- Hybrid electric vehicle con 2 macchine elettriche (EMs);
- Full Electric vehicle.

Per quanto riguarda la posizione del motore elettrico la classificazione per gli HEV con SEM segue lo schema in Fig. 1.1 .



La sigla *P* indica la posizione del motore elettrico e la sigla *C* la posizione della frizione.

Fig. 1.1: Indicazione posizione del motore elettrico.

A seconda delle diverse posizioni del singolo motore elettrico (SEM), ci sono 5 tipi di configurazioni:

- *P0* (avviamento / generatore a cinghia);
- *P1* (SEM montato sull'albero motore);
- *P2* (SEM montato sull'ingresso del cambio);
- *P3* (SEM montato sull'uscita del cambio);
- *P4* (SEM montato sull'asse motore);

Questa convenzione nasce con la possibilità di ibridizzare le vetture già esistenti e riconoscere il tipo di sistema utilizzato. Infine la principale classificazione dei veicoli ibridi elettrici si basa sull'architettura del sistema di propulsione come rappresentato in Fig 1.2 , a tale proposito si individuano tre principali configurazioni: Serie, Parallelo e Misto (Serie-Parallelo). A queste configurazioni principali spesso sono aggregate anche delle configurazioni più complesse che rappresentano l'evoluzione della configurazione standard serie-parallelo che utilizza il sistema EVT (Electric Variable Transmission), il quale può avere anche più di una modalità.

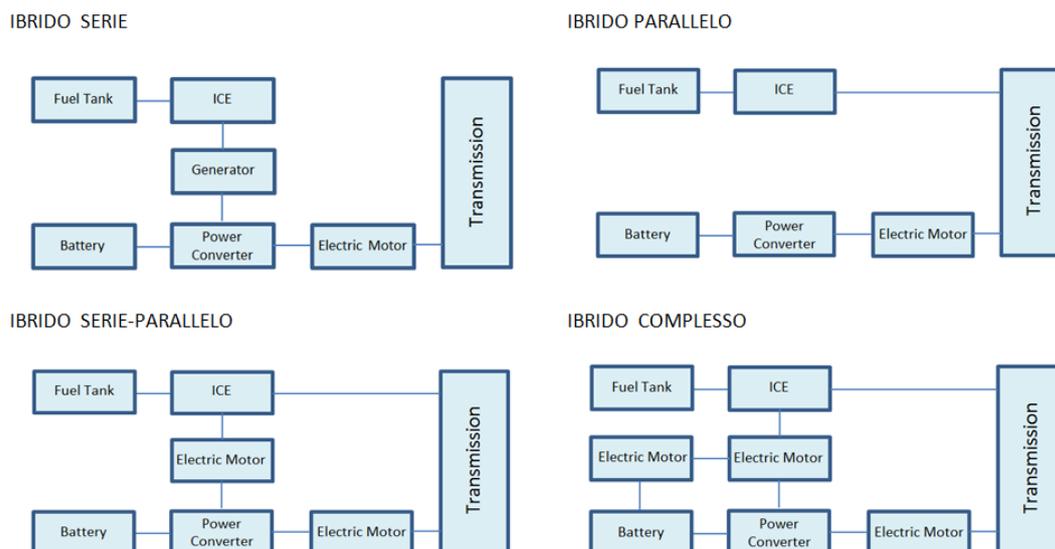


Fig. 1.2: Architetture principali di veicoli ibridi elettrici.

1.1 IBRIDO SERIE

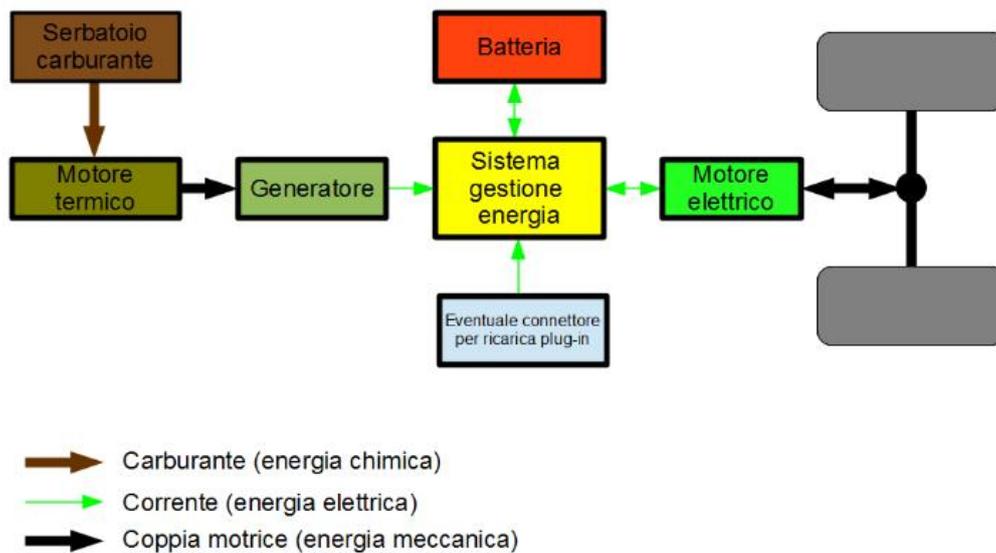


Fig. 1.3: Architettura veicolo ibrido serie.

Il veicolo ibrido elettrico serie, in Fig. 1.3, è caratterizzato da una architettura molto simile ad un veicolo elettrico puro. È costituito principalmente da motore termico, motore elettrico, generatore e pacco batterie. Il motore termico è svincolato dalle ruote e fornisce potenza meccanica al generatore che la converte in potenza elettrica. Esso ha il compito di generare la corrente per alimentare il motore elettrico che fornisce potenza meccanica alle ruote e permettere la trazione, mentre l'energia superflua viene utilizzata per ricaricare le batterie. Il veicolo presenta due macchine elettriche (EMs) di cui un generatore elettrico ha lo svantaggio di aggiungere costo e peso al sistema di trazione.

Il veicolo è trascinato soltanto per mezzo di un motore elettrico di trazione con un gruppo motogeneratore che fornisce la potenza elettrica mediamente richiesta per l'avanzamento del veicolo. Questo permette di dire che tale architettura ha un unico percorso energetico, tuttavia l'energia meccanica prodotta dal motore è convertita due volte; (da meccanica in elettrica nel generatore e da elettrica in meccanica nel motore elettrico di trazione); le perdite in questi processi si sommano producendo un effetto di riduzione dell'efficienza del sistema. Il motore elettrico di trazione deve essere dimensionato per la potenza massima del veicolo; pertanto, deve essere di notevole dimensioni, peso e costo.

Nei momenti in cui è richiesta una grande quantità di potenza si attinge energia elettrica sia dal generatore/motore termico sia dalla batteria. L'efficienza dei motori a combustione interna cambia al variare del numero di giri.

Dato il disaccoppiamento con le ruote, in un'ibrida in serie si possono creare le condizioni per ottimizzare il funzionamento del motore termico, perché questo deve solo produrre energia elettrica nel modo più efficiente possibile. Sarà poi il motore elettrico a variare il proprio regime di funzionamento per adeguarlo alle necessità della guida.

Grazie alle ottime prestazioni del motore elettrico nello spunto e ai bassi regimi, si può evitare di sovradimensionare il motore termico come si deve generalmente fare tradizionalmente per avere buone prestazioni in accelerazione e ripresa. Si attua dunque il downsizing e si tende a far lavorare il motore a punto fisso oppure seguire l'Economic-line, una caratteristica di coppia in funzione del numero di giri nel quale vi è il più basso consumo specifico di

combustibile. Questa impostazione dipende dal tipo di centralina e metodo numerico adottato al suo interno.

La caratteristica di coppia del motore elettrico permette la eliminazione del cambio di velocità a più rapporti semplificando l'intera trasmissione, ma può essere utile valutare di inserire un cambio di velocità a due rapporti ai fini di analisi della frenata rigenerativa e del recupero di energia elettrica. Alcuni veicoli sono dotati di moto-ruote, motori elettrici installati a ridosso delle ruote che gestiscono la coppia da fornire alle ruote stesse in tutte le condizioni di funzionamento, rendendo superfluo l'utilizzo del differenziale.

Gli ibridi serie sono i più efficienti per i veicoli che necessitano di continue frenate e ripartenze come le auto, autobus e taxi ad uso urbano. Se è previsto l'utilizzo su un ciclo extra-urbano il motore termico ha un limitato sottodimensionamento.

Il pacco batterie ha un volume più basso rispetto al veicolo elettrico puro, ma più ampio rispetto al veicolo ibrido elettrico parallelo.

Se la vettura esiste sia in versione puramente elettrica (quindi necessariamente plug-in come unica fonte di approvvigionamento dell'energia accumulata a bordo) sia in versione ibrida serie (non necessariamente plug-in in quanto grazie al motore termico è autonoma), allora questa seconda variante viene considerata un'evoluzione di una elettrica pura in grado di assicurare un'autonomia più estesa rispetto alle sole batterie, e viene infatti denominata "elettrica con range extender".

1.1.1 Modi di funzionamento

La vettura ibrida elettrica serie può avere diversi modi di funzionamento e possono essere elencati in questo modo:

- Modo batteria: il motore termico è spento e l'azionamento di trazione è alimentato dalla sola batteria;
- Modo motore: l'azionamento di trazione è alimentato dal motore termico/generatore;
- Modo combinato: il motore termico/generatore e la batteria alimentano l'azionamento di trazione;
- Modo power split: il motore termico/generatore alimenta l'azionamento di trazione e ricarica la batteria;
- Modo frenata rigenerativa: la macchina elettrica funziona da generatore in fase di frenata, trasformando l'energia meccanica in energia elettrica che viene stoccata nella batteria;
- Modo ricarica: se plug-in il veicolo fermo è connesso alla rete per la ricarica.

1.2 IBRIDO PARALLELO

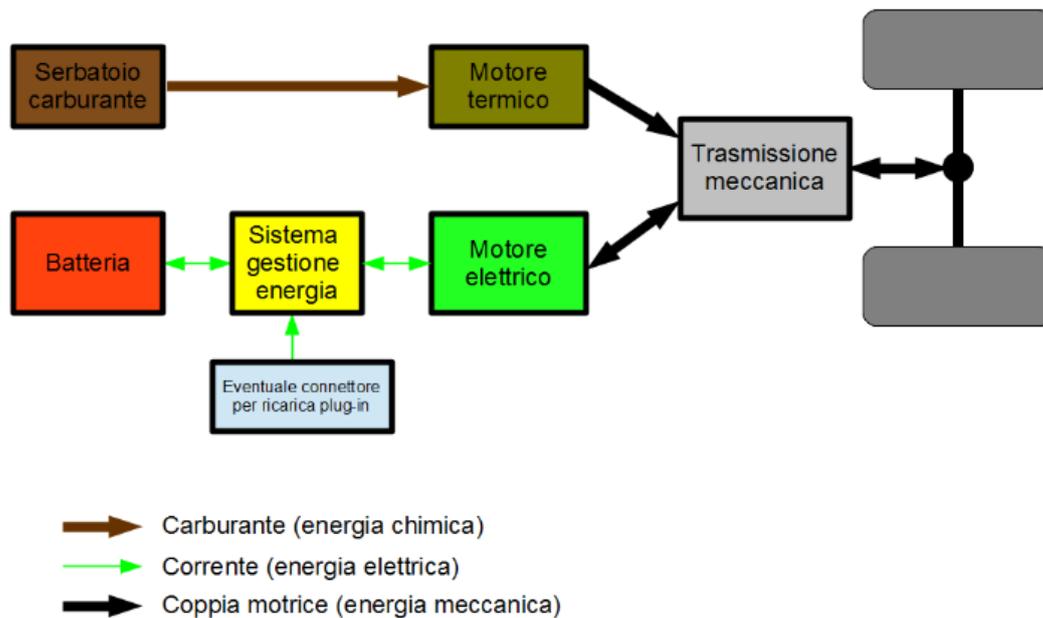


Fig. 1.4: Architettura veicolo ibrido parallelo.

Il veicolo ibrido elettrico parallelo, in Fig. 1.4, è principalmente costituito da motore termico, pacco batterie, un singolo motore elettrico/generatore (SEM), un nodo meccanico e trasmissione.

La definizione parallelo è dovuta al fatto che i due motori termico ed elettrico sono inseriti in parallelo e connessi tramite un nodo meccanico per sommare le due potenze in gioco.

Il motore termico è quindi vincolato alle ruote per cui a differenza dell'architettura serie non è possibile effettuare un accentuato downsizing e la velocità di rotazione dipende strettamente dalla velocità delle ruote.

Il motore a combustione interna è la parte dominante, fornisce una potenza continuativa circa costante e il motore elettrico ha la funzione di fornire una maggiore potenza nei momenti di necessità e per compensare le mancanze tipiche del motore termico, che sono: spunto a basso regime, recupero di energia in frenata.

Non si assiste alla doppia conversione, avendo dunque una unica conversione di energia elettrica in meccanica nel ramo elettrico, eliminando parte delle perdite.

In vista del vincolo motore termico ruote, tale architettura necessita di un cambio di velocità a diversi rapporti che può essere sia manuale che automatico, rendendo la trasmissione più complessa rispetto ad un veicolo ibrido serie.

Gli ibridi parallelo possono ulteriormente essere classificati a seconda della trasmissione, doppia trasmissione a ridosso di ognuno dei motori, unica trasmissione inserita subito dopo il nodo meccanico e ad assi indipendenti e in base alla posizione del motore elettrico.

Il veicolo ibrido elettrico parallelo esaminato è un P2 con motore elettrico inserito prima del cambio di velocità.

Il pacco batterie risulta di dimensioni decisamente più contenute rispetto ai veicoli ibrido serie, veicoli ibridi con predisposizione plug-in o veicoli elettrico puro, questo permette di avere minori tempi di ricarica e meno volume e peso occupato come mostra la Fig. 1.5. Questa architettura è utile a missioni diversificate adatte ai ritmi cittadini che ad un ciclo extraurbano.

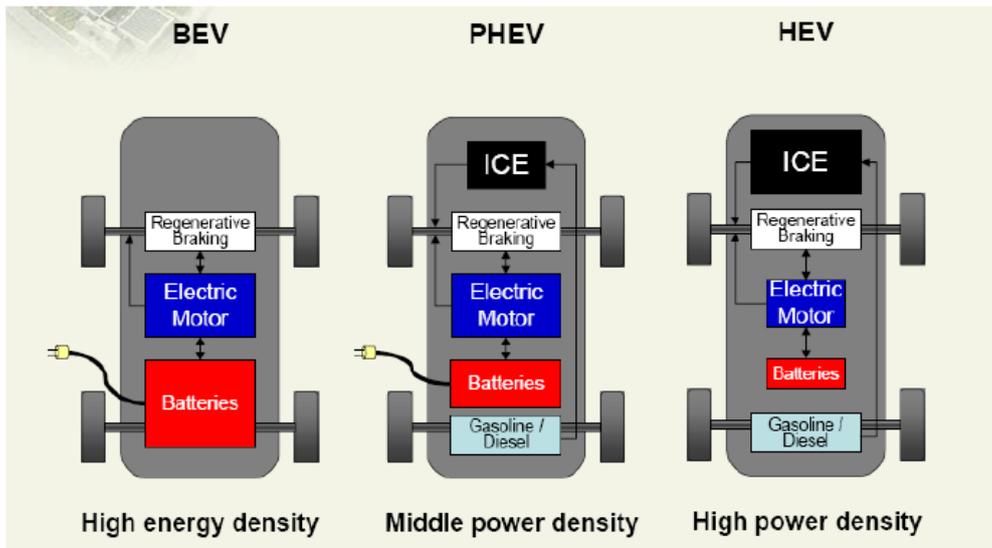


Fig. 1.5: Esempio di diversa elettrificazione di un veicolo.

1.2.1 Modi di funzionamento

La vettura ibrida elettrica parallela presenta i seguenti modi di funzionamento, in alcuni tratti simili alla vettura ibrida serie:

- Modo elettrico puro: il motore termico è spento, la propulsione avviene per mezzo del motore elettrico di trazione che è alimentato dalla sola batteria;
- Modo termico puro: il motore elettrico è spento, la propulsione avviene per mezzo del motore termico;
- Modo combinato: la propulsione avviene grazie alla potenza combinata del motore termico ed elettrico, il motore termico fornisce una potenza circa costante e il motore elettrico gestisce i picchi di potenza dovuti ai transitori.
- Modo power split: il motore termico fornisce potenza sia per la propulsione sia per la ricarica della batteria passando per il motore elettrico che funge da generatore;
- Modo frenata rigenerativa: cambia l'architettura del veicolo, ma il modo di funzionamento è simile al veicolo ibrido serie. In fase di frenata l'energia meccanica viene trasformata in energia elettrica dal motore/generatore elettrico alimentando la batteria;
- Modo ricarica: se il veicolo è plug-in, è prevista la modalità di ricarica da fermo.

1.3 IBRIDO SERIE-PARALLELO EVT

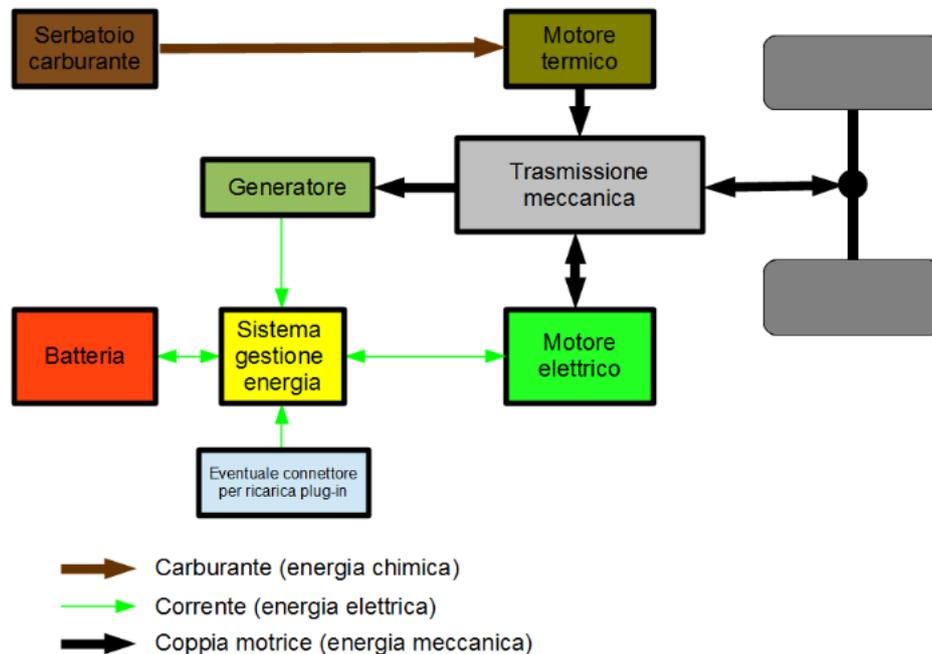


Fig. 1.6: Architettura veicolo serie-parallelo EVT 1 modo.

Lo schema ibrido serie-parallelo è più complesso e sofisticato, chiamato a volte anche schema misto. Tra tutti i tipi di HEV, le architetture powersplit sono il tipo più popolare, in quanto possono ottenere grande quantità di risparmio di carburante grazie anche alla funzione di trasmissione elettrica variabile (EVT), che disaccoppia il regime del motore dalla velocità del veicolo, tuttavia, questi sistemi EVT hanno bisogno di due macchine elettriche, con costo spesso più alto.

La loro caratteristica saliente è di ottenere un eccellente risparmio di carburante e riduzione delle emissioni attraverso diverse modalità operative, ad esempio modalità di arresto del minimo, modalità di assistenza al motore, modalità di carica e modalità di frenata rigenerativa.

Lo schema serie-parallelo coniuga le peculiarità dello schema serie con quelle dello schema parallelo, e consente di avvantaggiarsi, a seconda delle circostanze, dei vantaggi dell'uno o dell'altro, oltretutto con la possibilità di passare da una logica all'altra istantaneamente attraverso l'intelligente sistema EVT.

Dallo schema serie eredita la possibilità di usare il motore termico solo per generare corrente da destinare alla ricarica della batteria o all'alimentazione del motore elettrico, lasciando a quest'ultimo il compito di azionare le ruote; mentre dallo schema parallelo eredita invece la possibilità di far lavorare in tandem per la trazione il motore termico e quello elettrico, realizzando per entrambi una catena cinematica diretta verso le ruote. Da entrambi gli schemi infine si riprende la possibilità di recuperare energia in frenata per ricaricare la batteria riducendo così la necessità di attingere all'energia primaria.

Nel parco circolante su strada è il più diffuso fra i modelli attualmente sul mercato, in virtù del fatto di essere lo schema adottato da Toyota e Lexus per il suo sistema HSD. Esso ha attraversato quattro step evolutivi ed è utilizzato, con qualche variante o con differenze di dimensionamento, su numerosi modelli ibridi Toyota e Lexus. Un esempio è dato

dall'architettura della Toyota Prius o Yaris, che realizza l'accoppiamento meccanico tra il motore termico, le due macchine elettriche e l'albero di trasmissione finale attraverso la combinazione di un rotismo epicicloidale, denominato PSD (Power Split Device) ed una serie di rotismi.

La modalità costruttiva per realizzare tale ibrido può variare, infatti si possono ottenere tre configurazioni differenti che cambiano in base alla posizione dello split di potenza. Quindi si parlerà di “Input Split” quando lo split di potenza avviene subito dopo il motore termico ICE e un motore elettrico è connesso al PSD, mentre l’altro è vincolato all’uscita del rotismo e connesso alle ruote, configurazione scelta da Toyota in molte delle sue vetture. Si parlerà invece di “Output Split” quando lo split di potenza avviene a valle dei due motori elettrici. Infine la configurazione più complessa è rappresentata dal “Compound Split”, in cui si hanno due split di potenza sia a valle che a monte come rappresentato in Fig. 1.7 . Queste configurazioni possono essere combinate a formare a loro volta schemi di funzionamento più complessi chiamati EVT multi mode.

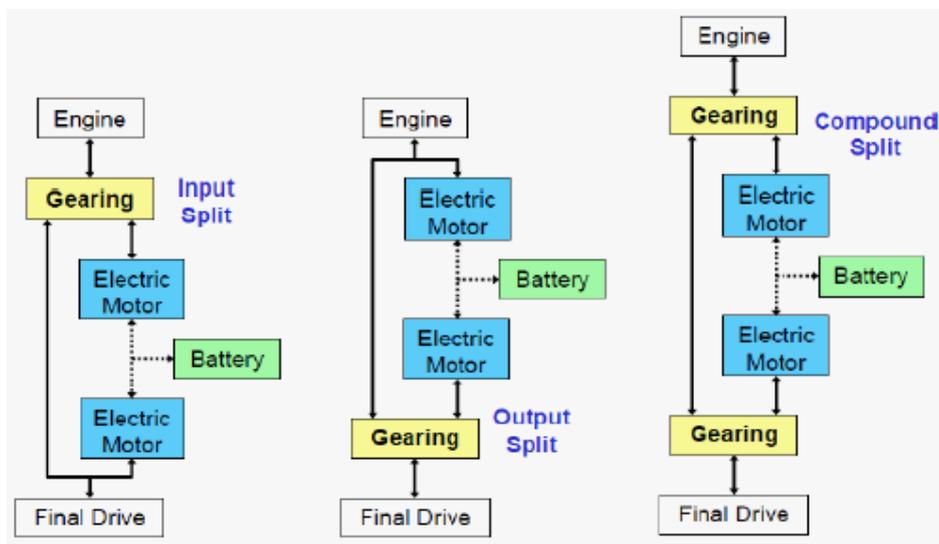


Fig. 1.7: Classificazione in base allo split di potenza.

1.3.1 Modi di funzionamento EVT 1 mode

Data la complessità dell’architettura, i modi di funzionamento sono molteplici e così elencati:

- Partenza e bassa velocità: il motore termico è spento, si interrompe il consumo di carburante e le emissioni, vi è la modalità zero emissioni. Il veicolo, dunque, è spinto dall’azionamento elettrico alimentato dalla batteria. Con un flusso energetico diretto dalla batteria alle ruote passando per il motore elettrico e la trasmissione, non considerando generatore e motore termico;
- Motore termico in funzione e coppia incanalata direttamente alle ruote; con o senza affiancamento del motore elettrico nella trazione, se viene affiancato il motore elettrico si ha un percorso di tipo parallelo. Vi sarà o un unico percorso energetico dal motore termico alle batterie oppure un doppio percorso energetico in parallelo con la trazione combinata;
- Motore termico in funzione e coppia diretta verso il generatore di corrente e motore elettrico; se la batteria è sufficientemente carica e il motore elettrico necessita di abbondante e/o costante corrente non fornibile per lunghi periodi data la capacità

motore EM2 al solare (sun) e il motore elettrico principale EM1 alla corona (ring) del rotismo epicicloidale. Il rapporto di trasmissione di coppia è fissato dalla geometria del rotismo epicicloidale, mentre la suddivisione della potenza tra percorso serie e parallelo è determinata dalle velocità relative dei singoli ingranaggi.

Per cui potremmo indicare la coppia in uscita come:

$$T_{out} = \frac{N_R}{N_R + N_S} T_{ICE} = \frac{1}{\tau_{EVT}} T_{ICE}$$

- N_R numero denti ring;
- N_S numero denti sun;
- T_{ICE} coppia motore termico ICE;
- τ_{EVT} rapporto di trasmissione, rapporto geometrico.

e la coppia alle ruote:

$$T_w = (T_{out} + T_{MG2}) \tau_f$$

- T_{out} coppia in uscita dal PSD;
- T_{MG2} coppia motore elettrico MG2;
- τ_f rapporto di trasmissione finale, fino alle ruote;

Il rapporto tra la velocità ICE e uscita del rotismo è determinato in funzione dei rapporti di trasmissione e della velocità del motore elettrico MG1:

$$\frac{\omega_{ICE}}{\omega_{out}} = \frac{1}{\tau_{EVT}} + \left(1 - \frac{1}{\tau_{EVT}}\right) \frac{\omega_{MG1}}{\omega_{out}}$$

La velocità alle ruote invece è espressa come:

$$\omega_w = \omega_{ICE} \left(1 + \frac{N_S}{N_R}\right) - \frac{N_S}{N_R} \omega_{MG1}$$

Per determinare la distribuzione della coppia e velocità all'interno del rotismo per i vari modi di funzionamento, ad esempio funzionamento puro elettrico, accensione termico e le altre elencate precedentemente ci atteniamo alla analogia della leva.

Il Power Split Device si incarica di conciliare l'esigenza di ottimizzare e per quanto possibile stabilizzare il regime di rotazione del motore termico con la necessità delle ruote di girare a velocità fortemente variabili in base alle condizioni di guida. Cercando al tempo stesso di dare al guidatore una esperienza di guida simile a quella di un'auto con cambio di velocità (come fosse un CVT, o addirittura dando l'illusione di un cambio robotizzato a rapporti discreti).

Per regolare la velocità del motore termico a quella fortemente variabile delle ruote, dunque, invece di utilizzare un cambio a rapporti discreti o continuo si fa variare la velocità di rotazione del motore elettrico EM2 connesso al solare, in modo tale che sia esso ad conciliare la differenza di velocità tra ruote, motore termico e motore elettrico EM1.

La Fig. 1.9 mostra lo schema di un EVT 1 mode inserito all'interno del veicolo per capire come sono connessi gli organi principali.

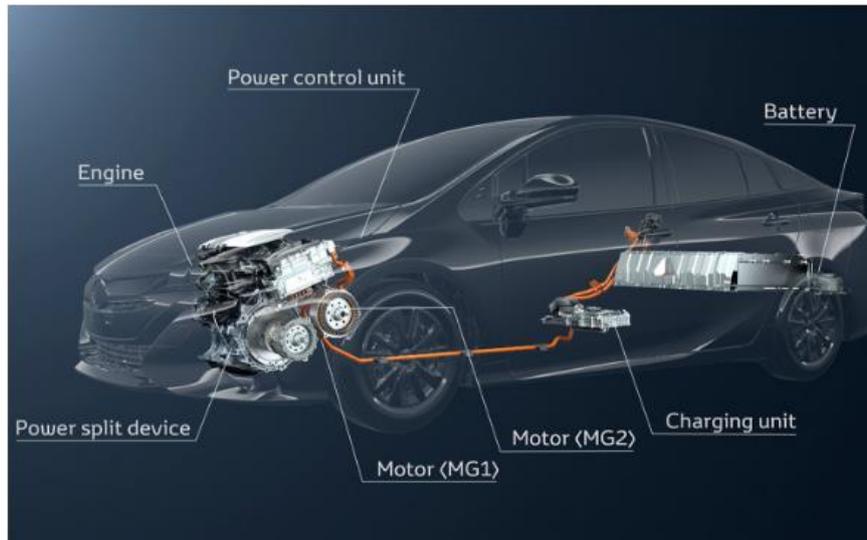


Fig. 1.9: Esempio veicolo EVT 1 mode: Toyota Prius.

1.3.3 Veicoli ibridi elettrici complessi con architettura EVT 2 mode

Una possibile evoluzione dell'architettura EVT 1 mode, descritta precedentemente è rappresentata dal sistema EVT 2 mode. Questa soluzione è stata studiata per primo dai ricercatori e ingegneri del gruppo General Motors per applicazioni di veicoli pesanti e SUV, che devono sopportare un maggiore carico.

Secondo i dati dichiarati dal gruppo GM, il sistema a due modalità può offrire fino al 30 [%] di aumento nel risparmio di carburante in un ciclo combinato città / autostrada e un miglioramento del 50 [%] solo in città.

Il sistema complesso si basa sull'utilizzo di due PSD e una serie di frizioni che permettono di selezionare la modalità migliore, quindi a seconda della strada e delle condizioni di carico, un sistema informatico complesso decide quale modalità di funzionamento attuare.

L'utilizzo di un doppio PSD fornisce un grado di libertà in più al sistema, il quale permette di selezionare tramite una serie di frizione una seconda modalità di funzionamento EVT oltre la modalità pura elettrica, ottenendo il cambiamento dei flussi di potenza tra i propulsori.

Si può effettuare il cambio in modo fluido, da una modalità di input split, di norma utilizzate nel sistema EVT 1 mode, ad una modalità di compound split, dove vi è un doppio split di potenza sia a monte che a valle del sistema EVT, con il fine di massimizzare l'efficienza del sistema in tutto il range dato dal rapporto della velocità ICE e velocità ruote, con il fine anche di ridurre le taglie dei motori elettrici installati a bordo veicolo, in modo da limitare anche volume, peso e costo.

Nel capitolo 6 è riportato l'implementazione di un modello meccanico e una serie di controlli per effettuare analisi nelle diverse modalità di operative con l'obiettivo di esaminare le condizioni di funzionamento dei vari componenti.

1.4 CICLI DI OMOLOGAZIONE

Al fine di poter classificare in modo universale i veicoli in base alle emissioni e consumo di combustibile sono stati introdotti i cicli di omologazione. Tali cicli rappresentano i percorsi classici, urbano, extraurbano e combinato che sono utilizzati per simulare le condizioni di utilizzo del veicolo in laboratorio, con l'obiettivo di ottenere coefficienti di emissioni e consumo attendibili.

I cicli di omologazioni variano in base alla zona di appartenenza e dove dovrebbe essere utilizzato il veicolo. Dunque vi sono differenti cicli legislativi che si differenziano per la tipologia di percorso, i più noti sono: in Europa è utilizzato il NEDC, negli stati uniti il FTP-75 e in Giappone il 10-15.

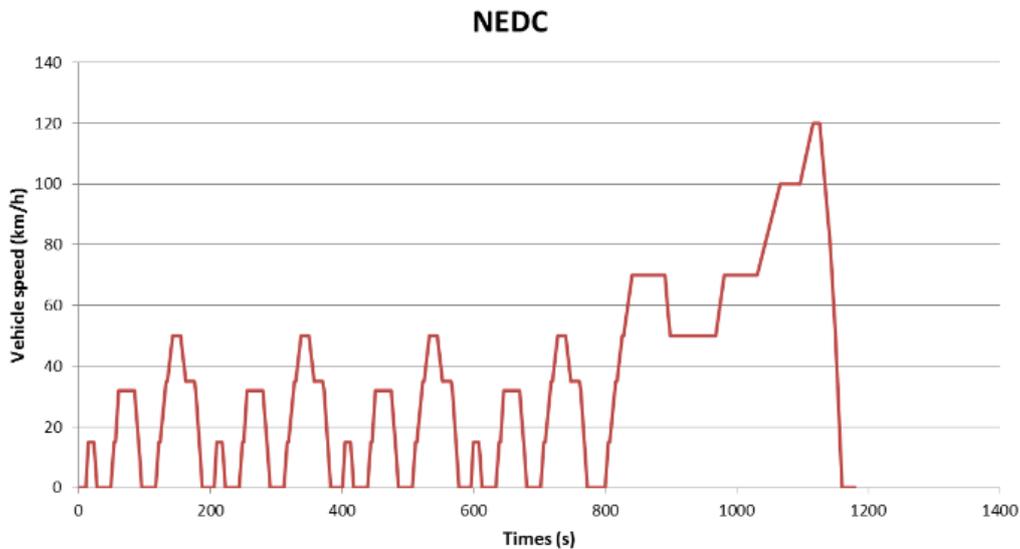


Fig. 1.10: Ciclo guida NEDC.

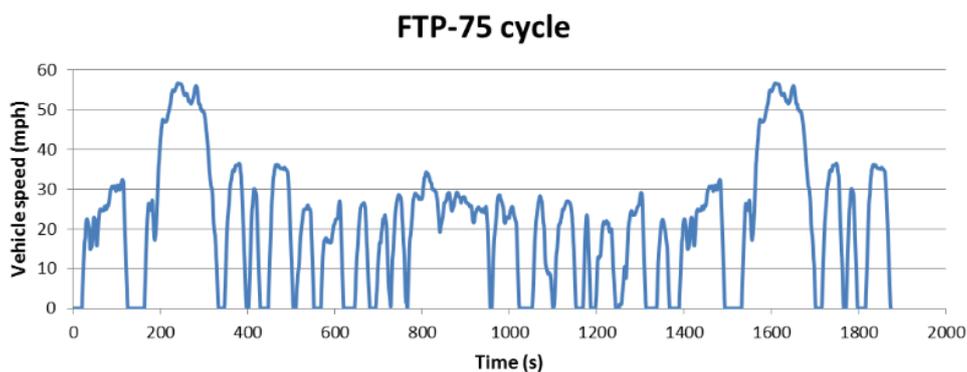


Fig. 1.11: Ciclo guida FRP-75.

Per quello che ci compete, il ciclo NEDC (New European Driving Cycle) è un ciclo combinato costituito da una serie di quattro cicli ECE-15 (ciclo guida cittadino, a velocità moderata che non supera i 50 km/h) e da un ciclo EUDC o EUDCL (ciclo guida extraurbano con velocità massima di 120 km/h).

L'Unione Europea, nel 2016 con entrata in vigore nell'autunno del 2017, ha decretato l'utilizzo di un nuovo ciclo guida WLTC (World Wide Harmonized Light-Duty Vehicles

Test Cycle). Tale ciclo nasce con il fine di integrare e sostituire il ciclo guida NEDC, considerato non più attendibile per lo stile di guida quotidiano.

Il ciclo guida WLTC è costituito da diverse fasi, che si basano su una stima di profili giornalieri degli automobilisti di tutto il mondo. Mentre NEDC determina valori urbani extraurbani e combinati, sulla base di un profilo guida teorico, il ciclo WLTC utilizza profili di guida più reali tratti da un indagine statistica globale. Il ciclo guida in questione è diviso in quattro parti con differenti velocità medie: bassa, media, alta e altissima. Ogni parte contiene una varietà di fasi di guida: stop, accelerazione e frenata che rappresentano il profilo di guida di tutti i giorni.

Il WLTC risulta avere elementi molto più rigidi che riguardano la realtà e inoltre prevede la definizione di standard per le vetture elettriche e ibride oltre a regole su altri inquinanti come etanolo, aldeidi, altri ossidi di azoto e NH_2 .

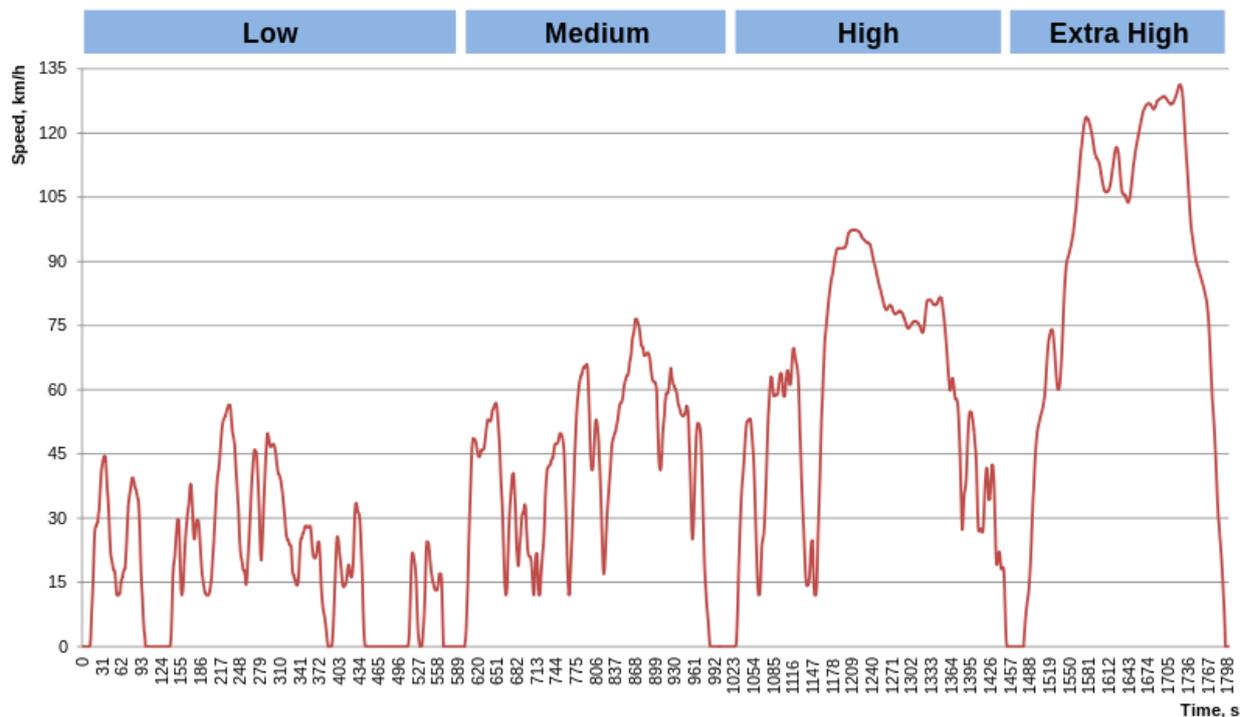


Fig. 1.12: Ciclo guida WLTC.

2 CAPITOLO: LIBRERIE PRINCIPALI

SIMCENTER AMESIM offre agli ingegneri una piattaforma di simulazione integrata per prevedere con precisione le prestazioni multidisciplinari dei sistemi intelligenti. Simcenter Amesim consente di modellare, simulare e analizzare sistemi controllati su più domini e offre funzionalità di modellazione degli impianti, per connettersi alla progettazione dei controlli, aiutando a valutare e convalidare le strategie di controllo.

Il software consente di effettuare test di prealimentazione, risparmiando tempo e costi. La soluzione affronta anche le molteplici sfide dell'ingegneria dei sistemi intelligenti. Combinando il meglio della simulazione dei sistemi meccatronici e delle competenze applicative, questa piattaforma di simulazione integrata aiuta le aziende e i tecnici a prendere le giuste scelte prima nel processo di progettazione e fornisce risultati di qualità elevata in tempo breve.

Il programma fornisce librerie di dominio fisiche per fluidi, termodinamica, elettricità, elettromeccanica, meccanica e elaborazione dei segnali, nonché librerie di applicazioni per sistemi di raffreddamento, climatizzazione, motori a combustione interna, aerospaziale e altri sistemi.

In questo capitolo sono descritte le librerie principali del software LMS Amesim utilizzate per l'intero assemblaggio e costruzione dei modelli. Sono stati opportunamente scelti dalle rispettive librerie, impostati o modificati i sottomodelli di ogni singolo componente del veicolo (dal modello del guidatore, al cambio, la batteria, ecc.). Essi sono costituiti da una elevata flessibilità che ci permette di studiare ed effettuare simulazioni temporali a differenti gradi di libertà, con il fine di eseguire analisi con il livello di complessità desiderato.

2.1 LIBRERIE UTILIZZATE

Il seguente lavoro si è servito di alcune delle principali librerie di LMS Amesim, contraddistinte specialmente per lo specifico colore:

- *Signal and Control*: utilizzato per la creazione di connessioni tra segnali, inserimento di controlli e creazione di PI o PID, caricare tabelle in entrata o salvare dati in uscita;
- *Mechanical*: comprende i diversi tipi di sensori, inerzie, motori termici ed elettrici, molle longitudinali e torsionali, ecc... ;
- *Powertrain*: comprende i principali componenti di un powertrain, ruote dentate per la costruzione manuale di un cambio di velocità, differenziale, convertitori di coppia, frizioni, sospensioni, sostegno motore, differenti sensori e impostazioni della strada;
- *IFP Drive*: è la libreria principale all'interno della quale è possibile selezionare dei blocchi che ci permettono di ottimizzare il veicolo. Possiamo trovare il tool HOT (Hybrid Optimization Tool), il tool motore termico, cambi di velocità, centraline per l'utilizzo di veicoli ibridi serie e parallelo, blocco driver e blocco veicolo;
- *Librerie powertrain demo*: comprende alcuni modelli di componenti demo che possono essere modificati e utilizzati nella creazione del modello completo di veicolo.

2.1.1 Hybrid Optimization Tool

Di interesse rilevante è il tool HOT (Hybrid Optimization Tool) presente nella libreria IFP Drive.



Attraverso il tool HOT è possibile effettuare una ottimizzazione del consumo di combustibile tenendo in considerazione differenti logiche di driveability, ottimizzazione del rapporto di marcia e creare un primo sketch di base della architettura desiderata.

Il tool si divide in diversi step:

- *Definizione del tipo di architettura:*

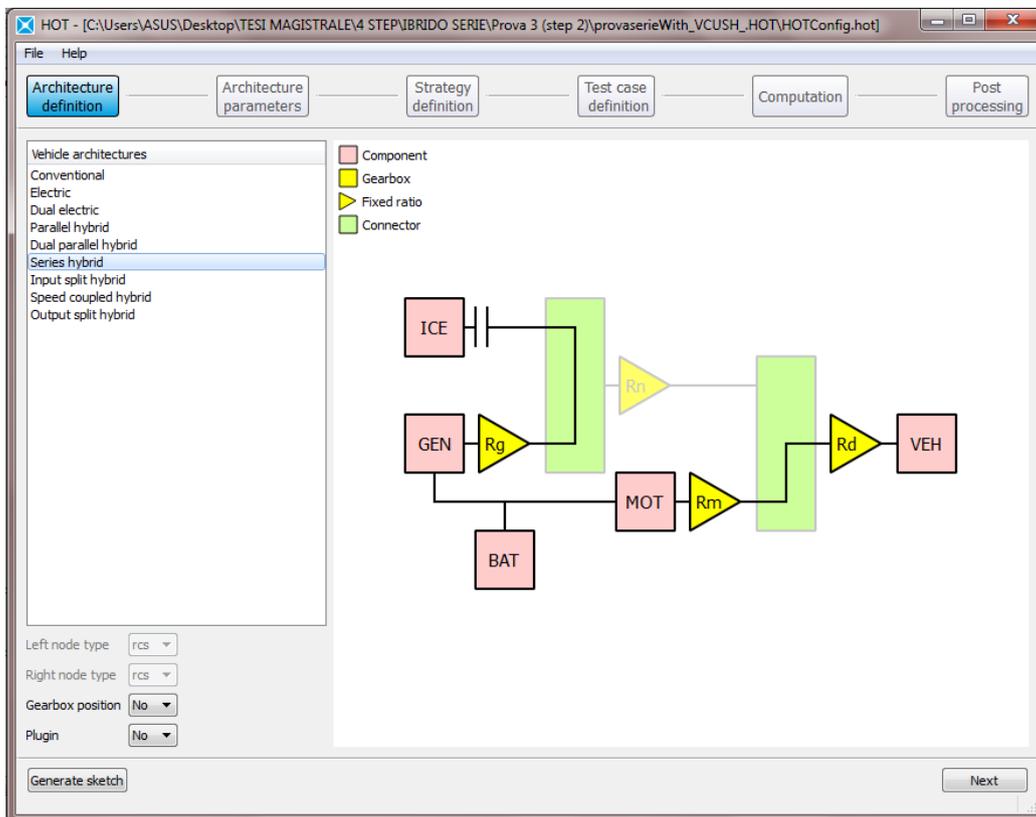


Fig. 2.1: Definizione tipo di Architettura.

In questo primo step possiamo selezionare quale tipo di architettura analizzare, impostare la funzione Plug-in e scegliere la posizione del cambio.

- *Parametri dell'architettura:*

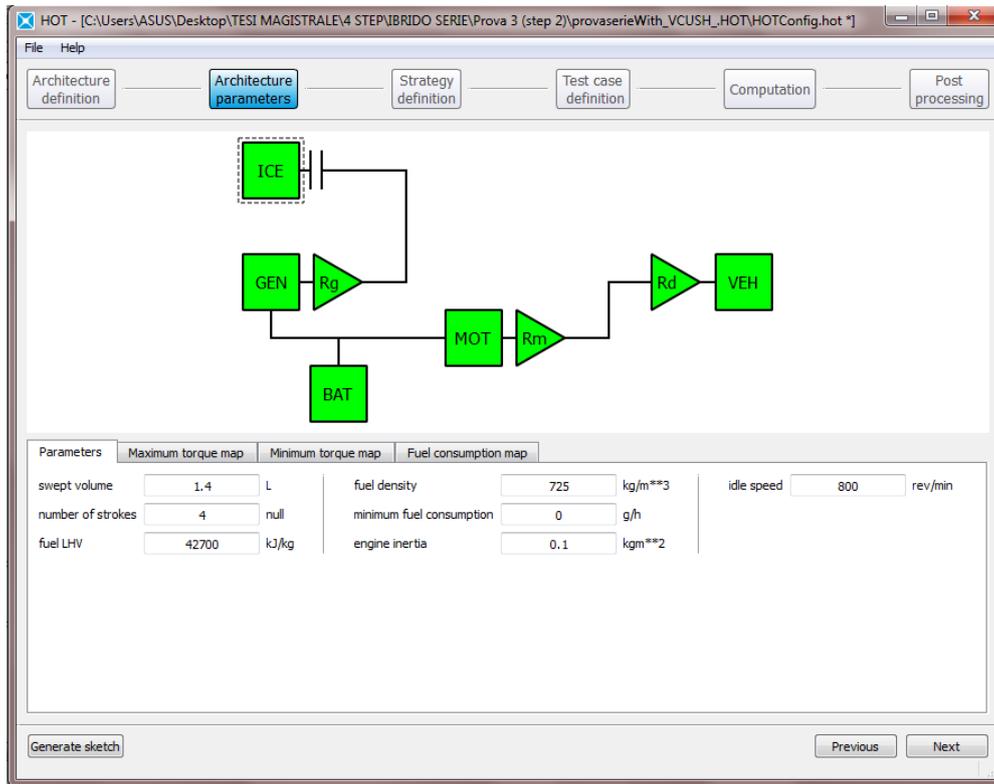


Fig. 2.2: Definizione parametri dell'architettura.

In questo passaggio si possono definire i vari organi del veicolo, selezionando ogni blocchetto e fissando i parametri desiderati. Si possono caricare le caratteristiche di coppia del motore termico, elettrico e generatore, impostare i parametri della batteria del cambio di velocità e del blocco veicolo.

- *Strategie:* in questo step possiamo definire:
 - i) I punti di ottimo coppia e velocità del motore termico dove vi saranno minori consumi di combustibile, questa opzione sarà disponibile solo per alcune delle architetture. Nel modello in parallelo non è possibile definire i punti di ottimo del motore termico dato che esso è vincolato alle ruote e non avrà un funzionamento nei pressi dei punti di ottimo;
 - ii) Strategie di driveability: tempi di accensione del motore durante uno start and stop, velocità minima al di sotto del quale il motore termico si spegne. Inserimento delle varie penalità allo spegnimento e accensione del motore in modo da ottimizzare l'utilizzo dello start and stop, penalità durante i cambi marcia e i tempi nei quali tali penalità restano in atto;
 - iii) Trasmissioni: è possibile definire una strategia di cambio marcia e una logica di passaggio da una marcia all'altra.
- *Definizione del ciclo guida:* in questo passaggio si definisce il tipo di ciclo guida su cui effettuare le analisi, e l'aggiunta di una eventuale pendenza. È possibile inserire anche un cambio marcia di default oppure si può scegliere di lasciarlo come una

variabile in modo da ottenere alla fine della simulazione un profilo di cambio marcia ottimizzato.

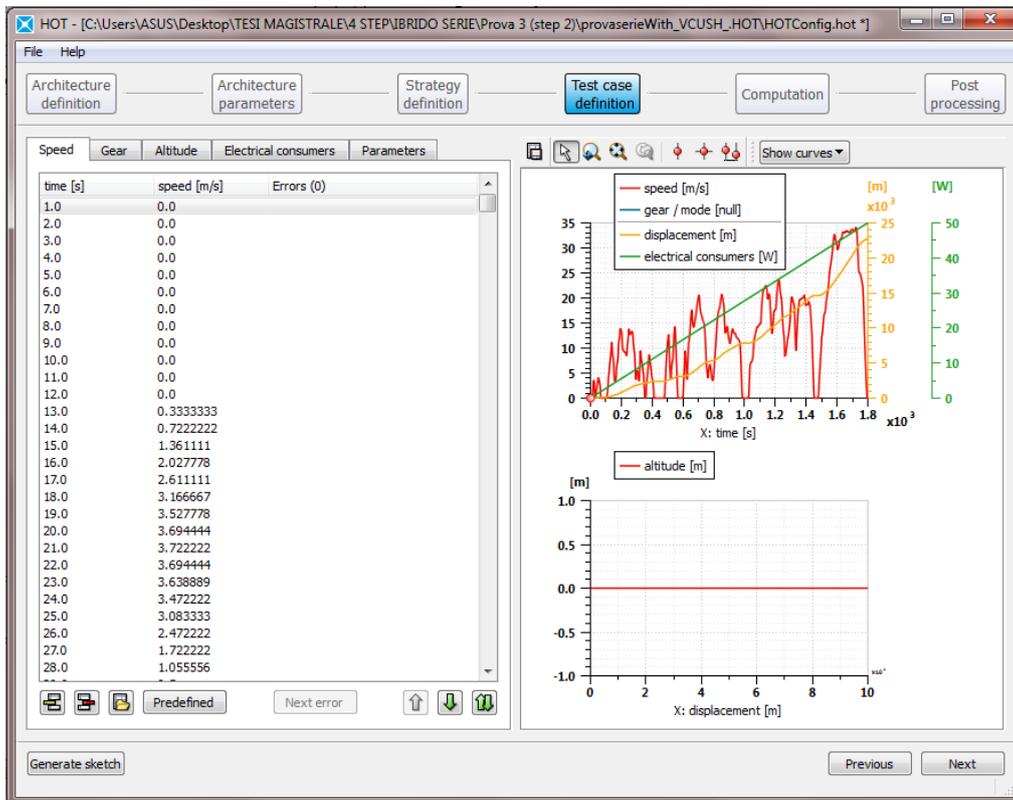


Fig. 2.3: Definizione ciclo di guida e impostazioni.

Possono essere inserite le perdite di potenza elettrica dovute agli accessori interni al veicolo e stabilire i valori iniziali e finali dello stato di carica desiderato al termine della simulazione;

- *Compilazione*: il tool HOTA è costituito da un algoritmo di ottimizzazione basato sul metodo del Principio del Minimo di Pontryagin (PMP). In un problema di ottimizzazione si vuole determinare il minimo (o massimo) valore di una funzione ed eventualmente il valore delle variabili per cui tale minimo o massimo viene raggiunto. In un problema di controllo ottimo sono presenti: l'insieme degli stati, l'insieme dei controlli, l'equazione dinamica, le condizioni iniziali del sistema, la funzione costo da ottimizzare, vincoli su stati e/o controlli.

Ogni architettura HEV ha uno o più gradi di libertà per soddisfare un ciclo di guida prescritto. Per l'HEV parallelo, ad esempio, la coppia totale alle ruote viene imposta dal ciclo da seguire, tuttavia, una tra la coppia del motore e quella della macchina elettrica può essere selezionata liberamente. In serie o HEV split-power vi è un grado di libertà più da scegliere, un valore di della curva di ottimo (ad es., i punti di velocità e coppia del motore a più basso consumo). La modalità cambio o trasmissione può rappresentare un ulteriore grado di libertà da ottimizzare, se non imposto con il ciclo.

Trovare la strategia di controllo ottimale significa quindi trovare il valore ottimale di ogni grado di libertà in ogni fase del ciclo. In questa versione di HOTA, il termine "ottimale" significa che riduce al minimo il consumo di carburante nel ciclo con un controllo sul SOC finale che deve essere uguale a un valore target. Questo problema di controllo ottimo può essere formulato come: trovare $u(t), \forall t \in [0, T]$ come:

$$\min_{u(t)} J = \int_0^T \dot{m}_f(u, t) dt$$

di cui:

$$\dot{SOC}(t) = f(u, t, SOC)$$

$$SOC(0) = SOC_0$$

$$SOC(T) = SOC_{target}$$

Dove:

- $u(t)$ rappresenta i gradi di libertà da ottimizzare ad esempio;
- $\dot{m}_f(u, t)$ rappresenta la portata di combustibile;
- SOC (state of charge) è lo stato di carica della batteria, l'istante iniziale e finale sono parametri entrambi fissati;

Ulteriori vincoli sono imposti a entrambi $u(t)$ e $SOC(t)$ al fine di far rispettare i limiti fisici, ovvero curve caratteristiche dei motori e batteria.

Il PMP afferma che ad ogni passo temporale, i valori ottimali dei gradi di libertà si trovano riducendo al minimo una funzione chiamata Hamiltoniana, cioè:

$$u^{opt}(t) = \operatorname{argmin} H(u, t, SOC)$$

$$H = \dot{m}_f H_{LHV} + \lambda_0 P_{ech} = P_{fuel}(t) + \lambda_0 P_{ech}$$

Che corrisponde nel trovare:

$$P_{eqv}(t) = P_{fuel}(t) + s_0 P_{batt}$$

- H_{LHV} è il potere calorico inferiore del combustibile;
- P_{ech} è la potenza elettrochimica della batteria;
- P_{batt} è la potenza erogata dalla batteria;
- λ_0 è un fattore di ponderazione che trasforma la potenza della batteria in carburante.
- s_0 è il fattore di equivalenza, rappresenta una riformulazione del moltiplicatore di Lagrange associato a SOC che è costante nel tempo ma si differenzia per ogni ciclo.

Allora potremmo dire che :

$$P_{ech} = f(P_{batt}, SOC) = \begin{cases} \frac{P_{batt}}{\eta_{batt}} & \text{se } P_{batt} \geq 0 \\ \eta_{batt} P_{batt} & \text{se } P_{batt} \leq 0 \end{cases}$$

Di conseguenza diremo che il fattore di equivalenza in base al fatto se la batteria è in ricarica o meno corrisponde ad essere:

$$s_{0\ ch} = \lambda_0 \eta_{batt} \quad s_{0\ dh} = \frac{\lambda_0}{\eta_{batt}}$$

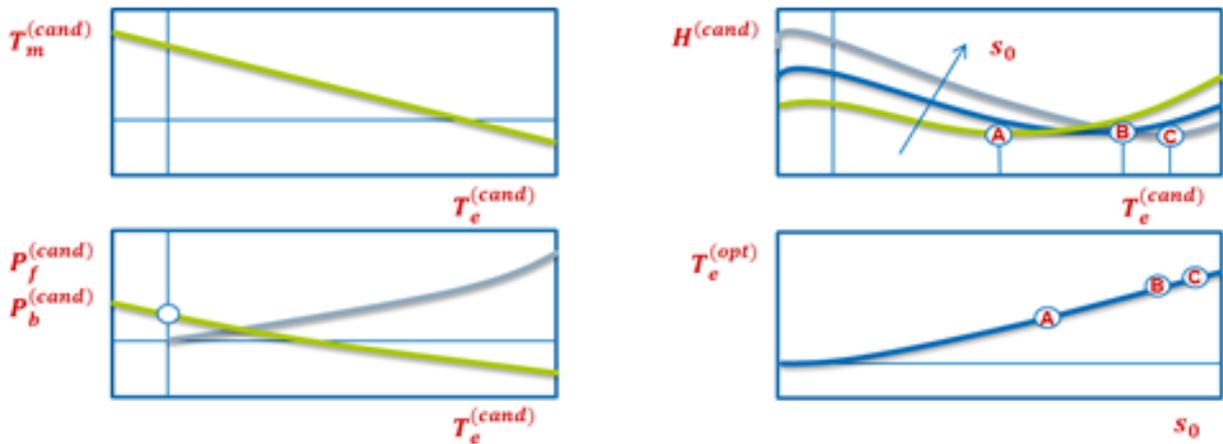


Fig. 2.4: Descrizione parametri.

In Fig. 2.4 è riportato un esempio per un ibrido parallelo, in una fase temporale t .

Viene ricercata la coppia del motore termico ottimale T_{ICE} . A seconda del valore di T_{ICE} e della coppia totale richiesta per la trazione, la coppia T_M del motore elettrico varia come illustrato nel grafico in alto a sinistra.

La potenza fornita dal combustibile $P_f = \dot{m}_f H_{LHV}$ varia come rappresentato nella curva grigia nel grafico in basso a sinistra e la potenza elettrochimica come la curva verde entrambe in funzione della coppia del motore termico.

Questo ci indica che maggiore sarà la coppia fornita dal motore elettrico, maggiore sarà la potenza elettrochimica che la batteria eroga, minore sarà la coppia del motore termico e minore sarà la quota di potenza fornita dal combustibile.

La funzione hamiltoniana è calcolata considerando il contributo di entrambe le potenze descritte. Essa dipende inoltre da s_0 e il grafico in alto a destra mostra tre variazioni di H per tre valori (A-B-C) di s_0 .

La posizione del minimo Hamiltoniano varia con s_0 , quindi del peso di potenza elettrochimica adottata, cioè influenza a sua volta il T_{ICE} ottimale. Allora otteniamo diversi valori di T_{ICE} in funzione di s_0 come mostrato nella Fig. 2.4 in basso a destra.

Si può notare che maggiore è il valore s_0 , maggiore è l'uso del motore (e viceversa). Il fattore di equivalenza può essere effettivamente considerato come il "prezzo" di carburante per uso esclusivamente elettrico.

Ad ogni passo di iterazione, l'algoritmo del tool HOTA rileva alcuni valori possibili per i gradi di libertà ("candidati"), $u(k), k = 1, \dots, N$. Quindi calcola i corrispondenti hamiltoniani $H(k)$, e alla fine trova $u_{opt}(t) = u(k_{opt})$ tale che $H(k_{opt}) = \min$.

Il fattore di equivalenza non viene imposto dall'utente ma viene calcolato in modo tale da soddisfare il vincolo SOC finale. Il diagramma di flusso HOTA di base è così rappresentato:

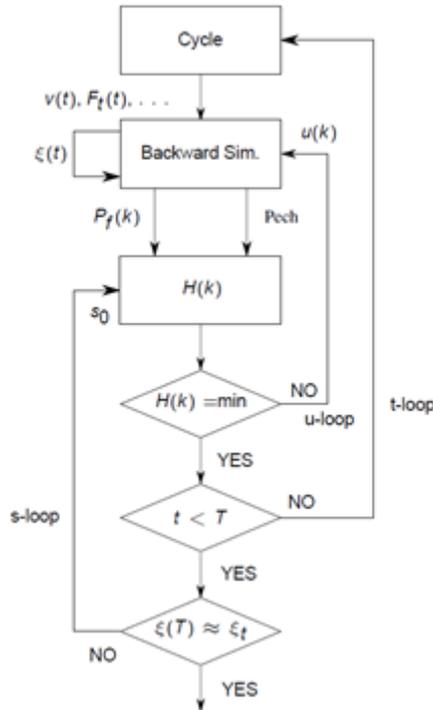


Fig. 2.5: Algoritmo implementato in HOT.

Con $\xi = SOC$.

Per calcolare s_0 , vengono eseguite diverse iterazioni, fino a quando non si esamina il completo ciclo di guida e viene raggiunta la convergenza (entro una tolleranza prescritta) tra il SOC finale e il SOC di destinazione.

Ulteriori caratteristiche di questa versione di HOT includono penalità e isteresi nel processo di minimizzazione della funzione Hamiltoniana ed evitare, ad esempio, arresti e avviamenti motore troppo frequenti o cambi di modalità di trasmissione.

- *Post processing*: se la simulazione va a convergenza è possibile consultare i risultati ottenuti. È possibile valutare le mappe del motore termico ed elettrico con i corrispettivi punti di funzionamento, effettuare analisi sullo stato di carica e ottenere le mappe di cambio marcia ottimizzato. Si rileva il fattore di equivalenza e successivamente si esegue il calcolo del consumo reale di combustibile, così rappresentato:

$$\dot{m}_{f_{corr}} = \dot{m}_f + \frac{(\Delta_E + \Delta_{E_{target}}) s_0}{H_{LHV}}$$

$$\Delta_E = \int I V_{ocv} dt$$

- $\dot{m}_{f_{corr}}$ è il consumo di combustibile corretto;
- Δ_E è l'energia spesa per ricaricare la batteria;
- I è l'intensità di corrente durante la scarica della batteria, durante la carica deve essere moltiplicata per una efficienza di ricarica;
- V_{ocv} è la tensione della batteria quando il circuito è aperto;

Se il SOC finale del target è uguale al SOC iniziale $\Delta_{E\ target} = 0$. Se il SOC finale del target è diverso dal SOC iniziale:

$$\Delta_{E\ target} = (SOC_{in} V_{in\ cell} - SOC_{fin} V_{fin\ cell}) n_{cell} C_{batt} + \frac{SOC_{in} - SOC_{fin}}{2} n_{cell} C_{batt} (V_{in\ cell} - V_{fin\ cell})$$

- n_{cell} è il numero di celle della batteria;
- C_{batt} è la capacità della batteria;
- $V_{in\ cell}$ è la tensione iniziale della singola cella della batteria;
- $V_{fin\ cell}$ è la tensione finale della singola cella della batteria.

Viene calcolato il consumo di carburante corretto sul ciclo:

$$\dot{m}_{f\ corr\ ciclo} = \frac{\dot{m}_{f\ corr}}{\rho_{fuel} x} 100$$

- ρ_{fuel} densità di combustibile;
- x distanza percorsa durante il ciclo.

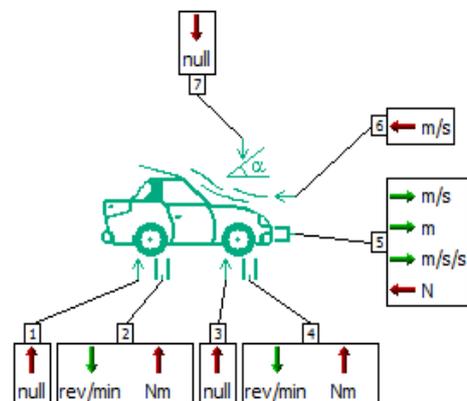
Dopo aver eseguito questa simulazione e ottimizzazione off-line attraverso il tool HOT è possibile generare uno sketch limitato in cui sono inseriti i sottomodelli degli organi principali del veicolo. Tale modello può essere integrato con dei modelli di driver, che simulano il comportamento del guidatore nel percorrere il ciclo guida e da opportune centraline che gestiscono l'azionamento dei diversi componenti con il fine di ottimizzare il consumo.

2.1.2 Longitudinal dynamic vehicle

I parametri generali del veicolo, possono essere opportunamente impostati nel sotto modello Longitudinal dynamic vehicle.

Segnali in ingresso:

- Porta 1 Comando di frenata asse posteriore (segnale);
- Porta 2 Coppia asse posteriore;
- Porta 3 Comando di frenata asse anteriore (segnale)
- Porta 4 Coppia asse anteriore;
- Porta 5 Forze esterne in entrata;
- Porta 6 Velocità del vento
- Porta 7 Pendenza della strada espresso in angolo



Segnali in uscita:

- Porta 2 Velocità angolare dell'asse posteriore
- Porta 4 Velocità angolare dell'asse anteriore
- Porta 5 Velocità veicolo, accelerazione veicolo, distanza.

Esso rappresenta un sottomodulo di dinamica longitudinale del veicolo privo di trasferimento di carico dovuto alle accelerazioni.

Definiamo ora alcuni dei parametri principali che saranno utilizzati nelle equazioni in seguito riportate.

Il raggio della ruota è così definito:

$$R = \frac{1}{2} D_{rim} + 0.01 h_{ty} w_{ty}$$

- D_{rim} diametro ruota;
- h_{ty} altezza ruota;
- w_{ty} larghezza ruota.

La massa totale del veicolo è ottenuta:

$$M = m + 4 \frac{J_r}{R^2}$$

- m massa veicolo senza ruote;
- J_r inerzia totale ruote.

Il modello in 2D di veicolo presenta la possibilità di trattare separatamente gli assi, sia quelli anteriori che quelli posteriori sono modellati (consentendo anche applicazioni 4x4) e vi è la possibilità di scegliere tra due configurazioni del veicolo:

- strada: con attrito volvente, pendenza stradale e resistenza aerodinamica presi in considerazione;
- banco di prova a rulli: con coefficienti di attrito del banco di prova definiti dall'utente.

Nel primo caso le equazioni per ottenere le forze di resistenza totale alla trazione sono:

$$F_{aereo} = \frac{1}{2} C_x S (v_{vh} + v_{wind})^2$$

$$F_{roll} = M g + (f + f_1 v_{vh} + f_2 v_{vh}^2)$$

$$F_{stop} = (M + m_L) g \sin(\tan^{-1} \frac{\alpha}{100})$$

$$F_{res} = F_{aereo} + F_{roll} + F_{stop}$$

- F_{aereo} resistenza aerodinamica;
- C_x coefficiente di forma del veicolo;
- S superficie frontale del veicolo;
- v_{vh} velocità del veicolo;
- v_{wind} velocità del vento;
- F_{roll} resistenza al rotolamento;
- f coefficiente di rotolamento indipendente dalla velocità;
- f_1 coefficiente di rotolamento dipendente dalla velocità;

- f_2 coefficiente di rotolamento dipendente dal quadrato della velocità;
- F_{slop} resistenza alla pendenza della strada;
- α angolo di pendenza della strada;
- F_{res} resistenza totale del veicolo;

Nel caso di test su banco prova:

$$F_{res} = F_{slop} + (a + b v_{vh} + c v_{vh}^2)$$

Dove a [N], b [N/(m/s)] e c [N/(m/s²)] sono i coefficienti definiti dall'utente, caratteristica del banco prova a rulli.

Inoltre, l'utente può scegliere tra due configurazioni longitudinali di scorrimento:

- senza slip: nessuna scorrimento tra pneumatico e terreno;
- con slip: parametri di slittamento longitudinale del pneumatico definiti dall'utente.

Nel primo caso la forza di trazione è ottenuta:

$$F_{drive} = \frac{(T_2 + T_4)}{R}$$

Nel secondo caso con lo scorrimento otteniamo:

$$s_l = 100 \frac{(R w_r \frac{\pi}{30} - v_{vh})}{v_{vh}}$$

Al denominatore quando la velocità è nulla per evitare la divisione per 0 viene inserito un valore pari a 0.1

A causa dello slittamento longitudinale, le velocità di rotazione degli assi non sono direttamente proporzionali alla velocità lineare del veicolo e sono definite come variabili di stato. La velocità angolare relativa della ruota w_{rel} [giri / min] tra il caso senza scivolamento e il caso con slip si ottiene come segue:

$$\omega_{rel} = \omega_r - \omega_{r_{no\ slip}} = \omega_r - \frac{v_{vh}}{R} \frac{30}{\pi}$$

Nel contatto tra il pneumatico e il terreno, le forze normali all'asse posteriore e all'asse anteriore sono date da:

$$F_{N_{rear}} = M g \cos(\arctan(0.01 \alpha)) \left(1 - \frac{m_{distr}}{100}\right)$$

$$F_{N_{front}} = M g \cos(\arctan(0.01 \alpha)) \frac{m_{distr}}{100}$$

Per ciascun asse, la forza longitudinale massima applicata al veicolo $F_{L,max}$ [N] dipende dalla forza normale al contatto pneumatico / terreno e dal coefficiente di attrito caratteristico del contatto. Quindi la forza longitudinale F_L trasmessa al veicolo viene calcolata, in questo caso, facendo uso della tangente iperbolica:

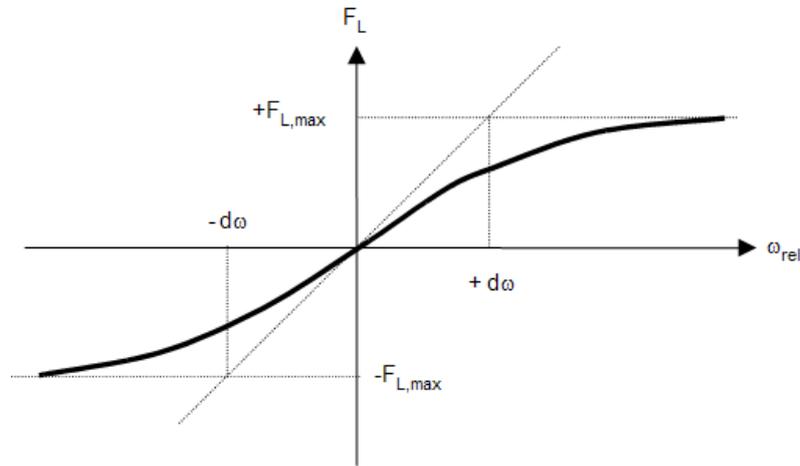


Fig. 2.6: Esempio della forza longitudinale calcolata mediante l'uso della tangente iperbolica.

$$F_L = F_{L,max} \tanh\left(2 \frac{\omega_{rel}}{d\omega}\right) = \mu F_N \tanh\left(2 \frac{\omega_{rel}}{d\omega}\right)$$

- $d\omega$ soglia di velocità per scorrimento longitudinale;
- μ coefficiente di aderenza;

Lo scorrimento longitudinale aumenta con l'aumento di $d\omega$ e il diminuire di μ .

Quindi la forza motrice applicata al veicolo è così calcolata:

$$F_{drive} = F_{L,rear} + F_{L,front}$$

Per quanto riguarda la fase di frenata per ogni asse viene applicato l'approccio della tangente iperbolica con il fine di ottenere la coppia di frenata. Essa è modulata in funzione della velocità di rotazione relativa ω_{rel} tra la ruota e la pinza del freno:

$$T_{bi} = T_{brake,max} \tanh\left(2 \frac{\omega_{rel,i}}{d\omega}\right) = \mu F_N \tanh\left(2 \frac{\omega_{rel}}{d\omega}\right)$$

- $T_{brake,max}$ rappresenta la massima coppia di frenata applicabile all'asse;

Quindi la forza frenante applicata al veicolo dall'impianto frenante è data da:

$$F_b = \frac{T_{b,front} + T_{b,rear}}{R}$$

Attraverso queste equazioni possiamo calcolare il contributo di frenata dovuto all'impianto frenante differenziandolo dal contributo ottenuto dalla frenata rigenerativa effettuata attraverso il motore elettrico.

Da questo sotto modello possiamo ottenere in uscita l'andamento nel tempo della velocità del veicolo e della sua accelerazione e confrontare con quelli dettati dal ciclo guida per effettuare l'analisi di raggiungimento della velocità e di jerk sull'accelerazione.

2.1.3 Driver

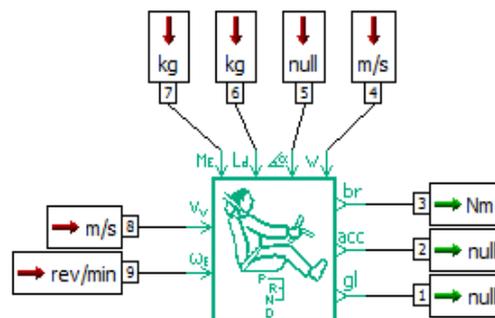
Il comportamento del guidatore, la selezione delle marce, l'accelerazione e frenata, sono simulati attraverso il modello di Driver. La libreria ci permette di scegliere fra diversi modelli che si differenziano in base al tipo di cambio utilizzato a valle dal veicolo e dall'utilizzo o meno del segnale di retroazione della velocità del veicolo e della velocità del motore termico.

Il modello di driver a cui faremo riferimento della maggior parte dei modelli riportati è quello che fa uso di segnali di retroazione e cambio automatico, chiamato dunque reverse driver.

Per il corretto funzionamento ha bisogno di avere in entrata alcuni dei parametri del veicolo. Tali parametri esterni possono essere presi dal sotto modello vehicle index descritto in precedenza e da opportuni sensori inseriti nel modello che rilevano la velocità del motore termico.

Segnali in ingresso:

- Porta 4 Velocità del vento v_{wind} ;
- Porta 5 Angolo pendenza della strada;
- Porta 6 Massa aggiuntiva al veicolo;
- Porta 7 Massa equivalente per la correzione dell'inerzia;
- Porta 8 Velocità veicolo alle ruote v_{vh} ;
- Porta 9 Velocità in uscita dal motore termico;



Segnali in uscita:

- Porta 1 Selezione della marcia;
- Porta 2 Comando accelerazione;
- Porta 3 Comando di frenata;

Le equazioni che governano il sotto modello cambiano in base al tipo di test che verrà richiesto e selezionato. Data la connessione con il modello vehicle index vi è la possibilità di utilizzare le equazioni che governano la resistenza al moto descritte in precedenza e i risultati ottenuti selezionando la voce nel menù di impostazione.

In questo sotto modello è possibile andare a utilizzare un incremento di carico del veicolo, il quale si somma alla massa del veicolo ottenendo dunque la massa totale M_{tot} .

Il modello di driver ha il ruolo di correggere la velocità del veicolo e cercare il più possibile di renderla uguale a quella desiderata dal ciclo guida. Per fare ciò si serve di un sistema di guadagno proporzionale sulla coppia e sulla potenza con l'obiettivo di ridurre l'errore tra le due velocità, ciclo guida e quella reale del veicolo.

Il procedimento inizia con il calcolo della forza di resistenza al moto $F_{res_{veicolo}}$ utilizzando le equazioni descritte nel paragrafo precedente e considerando la velocità dettata dal ciclo guida. In seguito si esegue il calcolo della forza totale:

$$F_{tot} = a M_{tot} + F_{res_{v_{cicle}}}$$

In seguito si calcola la coppia e la potenza:

$$T = F_{tot} R$$

$$P = F_{tot} v_{cicle}$$

Il modello di Driver calcola la forza totale da applicare sul veicolo dalla forza in tempo reale e quella con un istante successivo d_t .

Viene rilevato l'errore tra la velocità di controllo del ciclo e la velocità del veicolo:

$$e = v_{cicle} - v_{vh}$$

Il driver applica la correzione di coppia e potenza di volta in volta servendosi di un $gain_p$ guadagno proporzionale specificato:

$$T_i = T_{i-1} 100 gain_p e$$

$$P_i = P_{i-1} 100 gain_p e$$

Questo sistema permette dunque di ottenere in uscita le richieste di accelerazione e/o frenata per raggiungere la velocità desiderata. Il blocco driver è connesso con il sotto modello di centralina il quale gestisce gli azionamenti dei diversi motori.

2.1.4 Profile mission and environment data

Il sotto modello che gestisce i dati iniziali di ingresso per tutti i sotto modelli principale è il blocco "missione profilo e dati ambiente":



Cycle
MVEG-A or ECE+EUDC
MVEG-A or ECE+EUDC for automatic gearbox
NEDC
NEDC for automatic gearbox
10-15 mode
FTP-72 or UDDS
FTP-75
EPA Highway Fuel Economy Cycle HWFET
SFTP-SC03
SFTP-US06
JC08 hot
JC08 cold
WLTC class 1
WLTC class 2
WLTC class 3.1
WLTC class 3.2

Il blocco offre la possibilità di selezionare il tipo di ciclo guida che il sotto modello Driver dovrà tenere in considerazione. Possiamo decidere di adottare anche delle mappe personalizzate di ciclo guida, pendenza e incremento di carico del veicolo.

Fig. 2.7: Tipo di ciclo guida da selezionare.

Inoltre al suo interno si può inserire la mappa del cambio marcia ottimo, risultato della ottimizzazione attraverso il tool HOT.

Le altre impostazioni sono la velocità del vento, densità dell'aria e temperatura dell'ambiente.

2.1.5 ICE (Internal Combustion Engine)

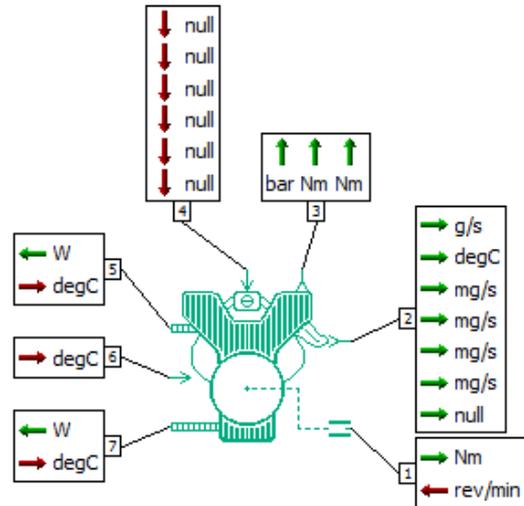
Il sotto modello del motore termico permette di scegliere il tipo di motore, inserire e impostare i diversi parametri caratteristici e da la possibilità di effettuare diverse analisi, selezionando e stabilendo il grado di complessità del sistema.

Segnali in ingresso:

- Porta 1 Velocità angolare albero motore in uscita;
- Porta 4 Segnali entranti determinati dalla ECU:
 - Accensione / spegnimento;
 - Fase accelerazione e non;
 - Surplus di consumo in fase di accensione;
 - Eventuale disattivazione dei cilindri;
- Porta 5 Temperatura del cilindro iniziale;
- Porta 6 Eventuale correzione della temperatura;
- Porta 7 Temperatura dell'olio nel circuito;

Segnali in uscita:

- Porta 1 Coppia albero motore in uscita;
- Porta 2 Informazioni riguardanti la temperatura gas in uscita e le quantità delle specie inquinanti;
- Porta 3 Segnale di retrazione alla ECU che individua il valore di pme e di coppia minima e massima;
- Porta 5 Potenza termica persa durante la combustione;
- Porta 7 Potenza termica persa per attrito;



È possibile andare ad individuare diversi tipi di funzionamento del sotto modello di motore e tra quelli riportati e disponibili utilizzeremo il blocco riguardante l'analisi su:

- Coppia e consumo specifico di carburante;
- Coppia, consumo specifico di carburante ed emissioni.

Il sotto modello è costituito da una sezione tool che permette di estrapolare le mappe utili delle caratteristiche del motore termico che potranno essere utilizzate nella impostazione della opportuna centralina.

Questo componente deve essere utilizzato ogni volta che è richiesta una prestazione del motore su un ciclo. Le previsioni del consumo di carburante e delle emissioni rispetto ai cicli di guida sono da ritenere accurate.

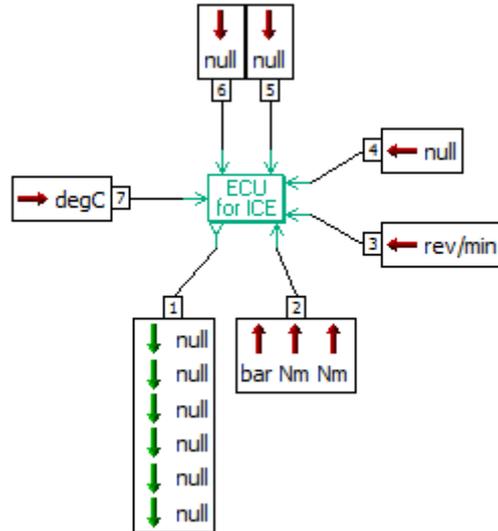
2.1.6 ECU (Engine Control Unit)

Questa ECU è un'unità di controllo del motore. Garantisce la corretta comunicazione tra la richiesta di carico del conducente e i segnali di controllo del motore infatti definisce la modalità di combustione, regolazione del regime minimo, regolazione della velocità massima, velocità di ripresa del carburante e quando richiesto logica di disattivazione dei cilindri se richiesto lavoro a carico parziale.

Inoltre la principale funzione è il collegamento tra la centralina e il motore termico, ovvero trasformare i segnali provenienti dalla centralina in opportuni comandi elettrici per li attuatori. Il sotto modello è rappresentato dal seguente schema e ha in ingresso e uscita le porte:

Segnali in ingresso:

- Porta 2 Valori di pme istantanea e di coppia massima e minima del motore termico;
- Porta 3 Valore della velocità di rotazione del motore termico;
- Porta 4 Efficienza di trasmissione;
- Porta 5 Segnale di accensione motore;
- Porta 6 Segnale di accelerazione richiesta dal driver;
- Porta 7 Temperatura del motore;



Segnali in uscita:

- Porta 1 Elaborazione di dati e comandi comprendenti:
 - Accensione/spengimento motore;
 - Coppia richiesta;
 - Modalità disattivazione cilindri;
 - Sovra consumo all'accensione motore.

La modalità di combustione può essere scelta e selezionata, il sottomodello offre tre modi tra cui il più frequente è quello attraverso la porta 5, ovvero il collegamento ad una centralina generale che ne ottimizza il funzionamento, oppure attraverso il caricamento di mappe e tabelle di valori di pme in funzione del numero di giri oppure, infine, inglobare anche la variabile temperatura se utile per l'analisi.

È utile riportare uno schema che rappresenti l'algoritmo implementato all'interno del sotto modello in descrizione e che mostri la sua logica di esecuzione:

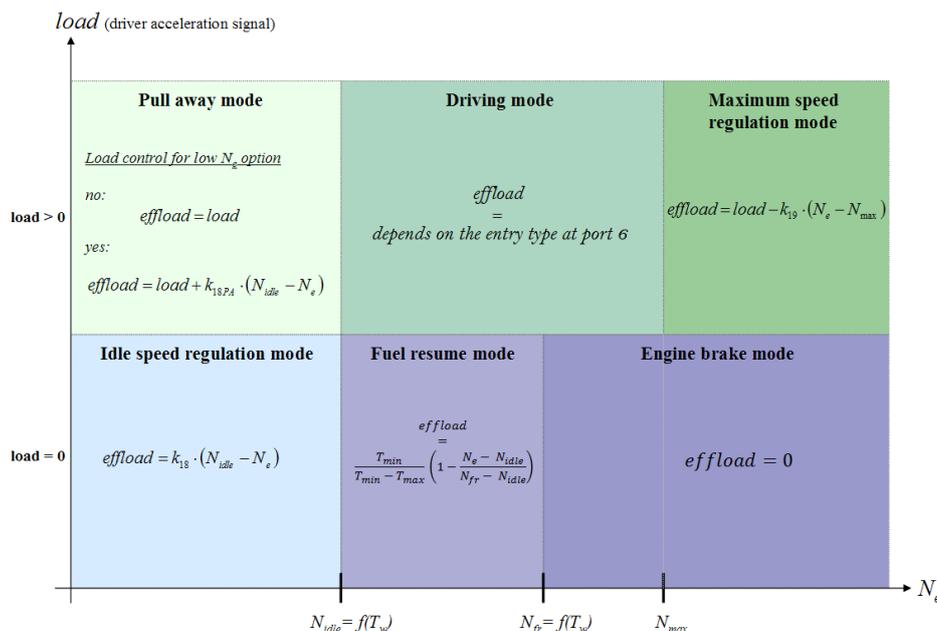


Fig. 2.8: Modalità di funzionamento ICE.

Dove :

- N_e è la velocità di rotazione in entrata dalla porta 3;
- $load$ è il carico richiesto dal driver in input dalla porta 6;
- N_{idle} è la velocità di rotazione minima impostata;
- N_{fuel} è la velocità di ripresa del carburante impostata dall'utente;
- N_{max} è la velocità di rotazione massima;
- k_{18} è il guadagno definito per la velocità minima;
- k_{18pa} è il guadagno definito per la velocità minima in fase di pull away;
- k_{19} è il guadagno definito dall'utente per la massima velocità di rotazione;
- T_{min} è la coppia minima;
- T_{max} è la coppia massima.

La modalità di ripresa del carburante corrisponde al riavvio dell'iniezione e mira ad anticipare la modalità di regolazione del regime minimo quando la velocità del motore scende al di sotto di N_{fuel} .

La variabile *effload* dipende dal valore in entrata dalla porta 6 e dalla sua unità di misura, se si tratta di un segnale esso stesso è uguale a *load*, altrimenti bisognerà andare a dividere e moltiplicare dei parametri dimensionali per avere in entrata il valore con l'unità di misura selezionata. In altri termini il carico del veicolo potrà essere selezionato come segnale, coppia o potenza.

In base all'algoritmo implementato nella ECU, la variabile "modalità di regolazione" indica la modalità corrente utilizzata per la regolazione infatti essa può assumere:

- -1 se in fase di frenata;
- 0 se il motore è fermo;
- 1 se in fuel resume mode;
- 2 se in idle speed regulation mode;
- 3 se in pull away mode;
- 4 se in driving mode;
- 5 se in maximum speed regulation mode.

L'ECU si occupa anche della selezione e impostazione della velocità di minimo del motore termico, può essere considerato un valore costante o variabile nel tempo. Il sottomodulo, inoltre, offre la possibilità di impostare una logica di disattivazione dei cilindri in modo da incrementare il rendimento quando è richiesto meno carico per evitare che i cilindri lavorino tutti a carico parziale ed a una condizione di funzionamento a basso rendimento. Nella voce sopra consumo è possibile inserire un consumo di combustibile extra quando il motore è avviato, oltre la penalità in termini di potenza che potrebbe essere stata inserita all'interno della logica di ottimizzazione della centralina.

2.1.7 Electric Motor / Generator

È un modello di motore / generatore elettrico standard con relativo convertitore elettronico di potenza, ai fini della nostra analisi non serve andare ad aumentare il grado di complessità del modello in atto. La coppia di uscita massima e minimi e le perdite di potenza complessive sia di perdite nel rame che nel ferro, possono essere determinate utilizzando file di dati opportunamente selezionati e caricati come mappe al suo interno o attraverso l'utilizzo di parametri caratteristici.

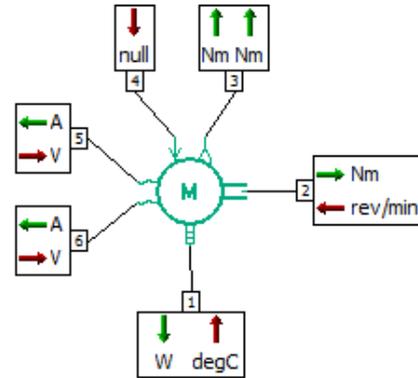
Questo modello è bidirezionale (motore / generatore) e indipendente dalla tecnologia del motore e del suo convertitore. Il sotto modello è così composto:

Segnali in ingresso:

- Porta 1 Temperatura del motore;
- Porta 2 Velocità angolare albero in uscita;;
- Porta 4 Segnale di attuazione della coppia;
- Porta 5 Tensione del motore;
- Porta 6 Tensione massa;

Segnali in uscita:

- Porta 1 Potenza persa;
- Porta 2 Coppia albero in uscita;
- Porta 3 Coppia massima e minima motore;
- Porta 5 Corrente motore;
- Porta 6 Corrente massa.



Al fine di un corretto funzionamento e per avere in uscita i valori di coppia e corrente il modello utilizza delle mappe in riferimento alla caratteristica di coppia minima e massima e alle perdite di potenza. Con i dati estrapolati e i segnali provenienti dagli altri sotto modelli principali tale sotto modello elabora un output mediante una interpolazione lineare.

La richiesta di coppia in uscita dalla centralina e in entrata al sotto modello del motore elettrico deve essere delimitata superiormente e inferiormente dai valori di coppia massima e minima. Il motore non riuscirà a fornire al veicolo una coppia superiore o inferiore a quelle impostate all'interno della mappa. La coppia in uscita sarà determinata attraverso la legge del ritardo del primo ordine:

$$T_M = \frac{1}{1 + t_r s} T_{lim}$$

- T_{lim} è la coppia richiesta dalla centralina dopo essere stata limitata e confrontata con il valore di coppia massima e minima per quella velocità di funzionamento del motore;
- t_r costante di tempo definita dall'utente;
- s costante di tempo per determinare la coppia, consigliata 1.5 .

La potenza meccanica sarà dunque determinata dal prodotto della coppia richiesta e la velocità angolare ω :

$$P_m = T_m \omega$$

Definito un rendimento di conversione della energia η la potenza persa sarà determinata:

$$P_{lost} = P_m(1 - \eta)$$

e la potenza elettrica dunque:

$$P_{ele} = P_m - P_{lost}$$

Inoltre le diverse modalità operative del motore / generatore elettrico possono essere illustrate nello schema in un diagramma coppia velocità:

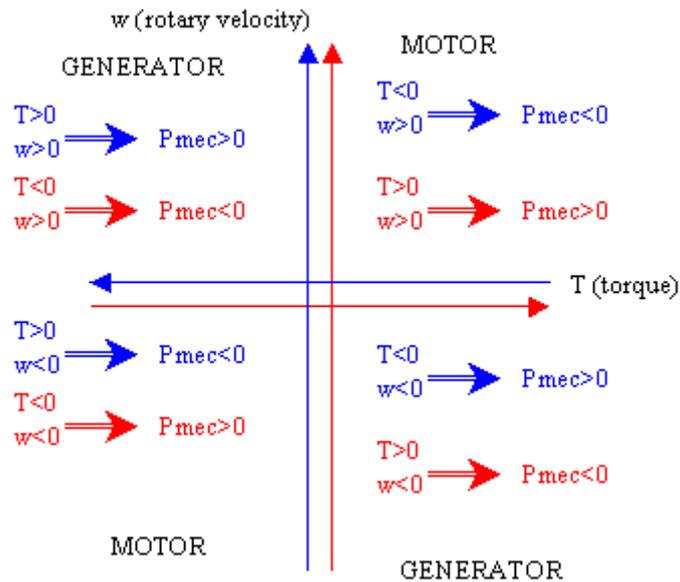


Fig. 2.9: Convenzione per macchina elettrica.

La convenzione del segno più comune è in rosso, ma quella utilizzata nel software LMS Amesim è in blu. Per cui se la potenza meccanica è positiva la macchina lavora come un generatore, viceversa con potenza meccanica negativa la macchina lavora come motore. Per quanto riguarda la quantità di corrente in uscita dalla porta 5, essa può essere determinata mediante l'equazione:

$$I = \frac{P_m - P_{lost}}{V} = \frac{P_{ele}}{V}$$

In cui V è la differenza di potenziale dovuta alla differenza della tensione alla Porta 5 e quella della porta collegata con la massa.

In alcuni casi per evitare la divisione per 0 qualora la differenza tra le tensioni fosse nulla viene introdotto un valore di V_{lim} che varia di zona in zona come rappresentato nella Fig.2.10.

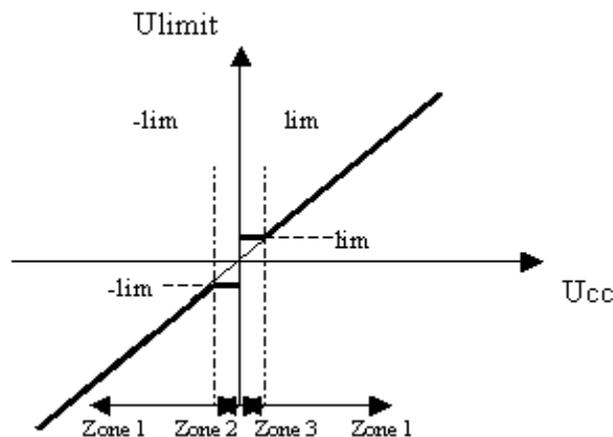


Fig. 2.10: Rappresentazione grafica del valore di V_{lim} .

Si consiglia dunque di utilizzare nella zona 1 un valore di $V_{lim} = V$, nella zona 2 un valore di $V_{lim} = -10^{-3}$ e infine nella zona 3 un valore pari a $V_{lim} = 10^{-3}$.

2.1.8 Battery

Questo è un sotto modulo di batteria. È un modello di batteria considerato reale, che caratterizza il pacco batteria con una fonte di tensione e una resistenza interna equivalente. Viene utilizzato come fonte di energia elettrica per dispositivi elettrici come motori elettrici, accessori elettrici per auto ed elettronica di potenza.

La batteria, Fig. 2.11, è composta da banchi di batteria disposti in serie e in parallelo; ogni banco di batteria è composta da celle interne. La singola cella ha un circuito equivalente interno assimilabile ad una tensione iniziale più una tensione proporzionale alla singola resistenza interna.

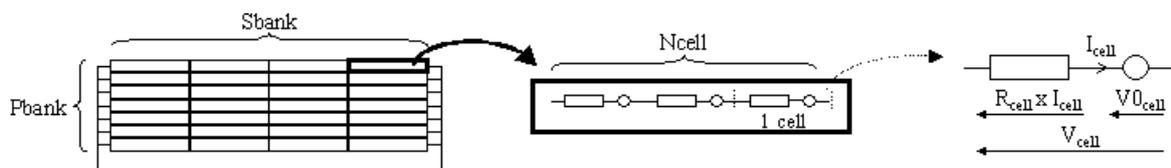


Fig. 2.11: Schema rappresentativo di una batteria.

Lo schema principale del sottomodulo è connesso agli altri sottomodelli principali attraverso le seguenti porte:

Segnali in ingresso:

Porta 1 Tensione di massa;

Porta 2 Corrente batteria;

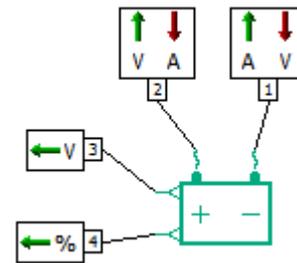
Segnali in uscita:

Porta 1 Corrente di massa;

Porta 2 Tensione batteria;

Porta 3 Tensione a circuito aperto;

Porta 4 SOC % (state of charge);



Il modello deve essere impostato inserendo i valori di SOC % e tensione di partenza, specificando il numero di banchi inseriti in serie e in parallelo, il numero di celle per banco e la capacità nominale, che è la quantità massima di carica che la batteria può fornire. Possono essere caricate delle mappe e tabelle con i valori di resistenza interna e di tensione di circuito aperto in funzione del DOD (depth of discharge).

La tensione di uscita della batteria viene calcolata mediante la legge matematica:

$$V = V_0 - R I + V^-$$

- V_0 è la tensione a circuito aperto;
- V^- è la tensione iniziale;
- R è la resistenza interna equivalente della batteria;
- I è la corrente iniziale.

Sono necessari dati sperimentali per descrivere la tensione a circuito aperto e la resistenza interna equivalente. Inoltre gli effetti termici non vengono presi in considerazione nella nostra analisi.

La corrente I_{cell} e la tensione V_{cell} per singola cella è calcolata mediante l'equazione:

$$I_{cell} = \frac{-I^+}{n_{p\ bank}}$$

$$V_{cell} = V_{0\ cell} - R_{cell} I_{cell}$$

- $-I^+$ è la corrente Porta 2;
- $n_{p\ bank}$ è il numero di banchi in parallelo;
- $V_{0\ cell}$ è la tensione iniziale della singola cella.

Di conseguenza la tensione di un banco di batteria V_{bank} e la tensione totale V^+ in uscita alla porta 2 sarà :

$$V_{bank} = V_{cell} n_{cell}$$

$$V^+ = V_{bank} n_{s\ bank} + V_{minus}$$

- n_{cell} è il numero di celle;
- $n_{s\ bank}$ è il numero di banchi in serie;
- V_{minus} è la tensione Porta 1;
-

Per quanto riguarda lo stato di carica SOC [%] della batteria che può essere compreso tra 0 e 100, è una variabile di stato che viene calcolata eseguendo l'integrazione dell'equazione riportata:

$$\frac{dSOC}{dt} = -\frac{dq}{dt} \frac{100}{C_n}$$

- $\frac{dq}{dt} = -I^+$ è la quantità di corrente dell'intera batteria;
- C_n è la capacità nominale della batteria.

La profondità di scarica DOD [%] (Death of Discharge) viene utilizzata come ingresso per leggere la tensione a circuito aperto e i file di dati di resistenza interni viene ricavata mediante la legge:

$$DOC = 100 - SOC$$

2.1.9 Power Split Device

Il PSD può essere schematizzato mediante il seguente sottomodulo provvisto d'inerzia di tutti gli ingranaggi e perdite viscose. Le convenzioni adottate sono rappresentate in Fig. 2.12 .

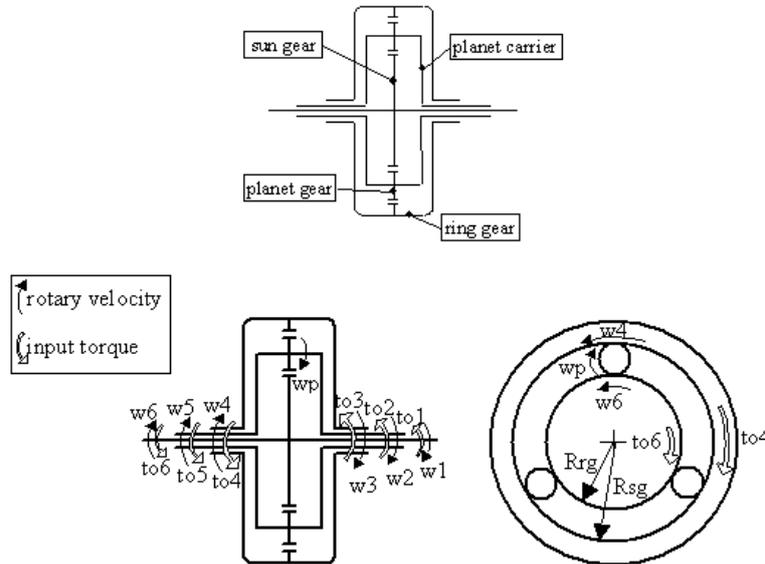


Fig. 2.12: Struttura Power Split Device e convenzione.

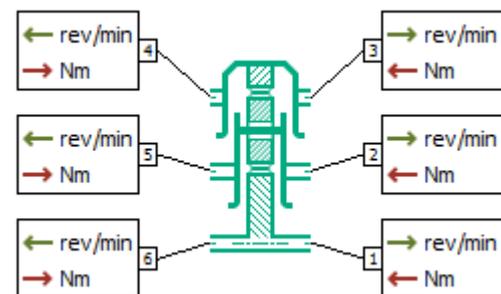
Il sottomodulo è schematizzato in figura, ove sono riportate le porte di connessione con il resto del modello.

Segnali in ingresso:

- Porta 1 Coppia entrata al solare (sun);
- Porta 2 Coppia entrata al portatreno (carrier);
- Porta 3 Coppia entrata alla corona (ring);
- Porta 4 Coppia entrata al solare (sun) (duplicato);
- Porta 5 Coppia entrata al portatreno (carrier) (duplicato);
- Porta 6 Coppia entrata alla corona (ring) (duplicato).

Segnali in uscita:

- Porta 1 velocità uscita al solare (sun);
- Porta 2 velocità uscita al portatreno (carrier);
- Porta 3 velocità uscita alla corona (ring);
- Porta 4 velocità uscita al solare (sun) (duplicato);
- Porta 5 velocità uscita al portatreno (carrier) (duplicato) ;
- Porta 6 velocità uscita alla corona (ring) (duplicato).



Le porte che ricevono i duplicati possono essere connessi a delle costanti pari a 0 oppure al resto del sistema, dipende dallo schema di veicolo adottato.

Inoltre le equazioni adottate all'interno del modello sono le stesse che vengono riportate nel paragrafo di spiegazione del Power Split Device.

3 CAPITOLO : VEICOLO IBRIDO ELETTRICO SERIE o VEICOLO ELETTRICO CON RANGE EXTENDER

Collegando appositamente e assemblando i sotto modelli di tutti i componenti necessari sono stati creati modelli numerici completi di tre diversi veicoli appartenenti ad altrettante diverse categorie di veicoli per cui la tecnologia ibrida necessita ancora di sviluppi e analisi: un veicolo ibrido elettrico in serie, una vettura ibrida elettrica in parallelo, un veicolo ibrido elettrico serie-parallelo.

In questo capitolo è stato illustrato la creazione di un modello di veicolo elettrico con range extender e sono state eseguite le seguenti analisi con il tool HOT:

- Veicolo elettrico range extender;
 - Simulazione principale;
 - Simulazione con diverse metriche di driveability;
- Veicolo elettrico range extender con cambio velocità;
 - Simulazione con diverse metriche di driveability;
- Veicolo elettrico range extender su ciclo WLTP ridotto;
- Veicolo ibrido serie con impostazione plug-ing.

In seguito è stato creato un modello di veicolo elettrico range extender, con le medesime caratteristiche del modello analizzato con il tool HOT, mediante l'assemblaggio dei vari organi e sottomodelli disponibili nelle apposite librerie e sono state eseguite analisi:

- Inseguimento della velocità e accelerazione;
- Livello dello stato di carica della batteria;
- Flusso di potenza ICE, GEN, MOT e BAT;
- Frenata rigenerativa e andamento temporale della potenza ripristinata.

3.1 Ottimizzazione attraverso Hybrid optimization tool

Il primo veicolo ibrido elettrico analizzato è un veicolo elettrico con range extender, adatto per la trazione in ambito urbano ed extraurbano. Utilizzando il tool HOT abbiamo eseguito e creato un modello che presenta la seguente architettura:

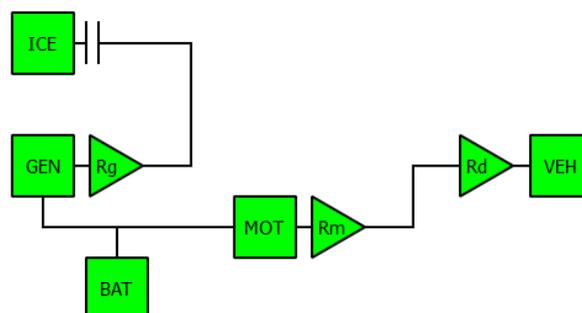


Fig. 3.1: Architettura veicolo ibrido serie.

Dato la struttura ibrida serie il motore termico ICE (Ice Combustion Engine) può essere soggetto ad una riduzione delle dimensioni e della cilindrata applicando un downsizing con l'obiettivo di farlo funzionare il più possibile per un punti di funzionamento ottimali oppure

per una serie di punti della Economic line e avere delle prestazioni migliori e una più alta efficienza ai giri selezionati dal motore. L'ICE presenta tali caratteristiche:

Coppia massima:	120.5 [Nm] a 3750 [rpm]
Potenza massima:	80.38 [Cv] a 5000 [rpm]
Cilindrata:	1.4 [l]
Numero di cilindri:	4
Numero di valvole per cilindro:	4
Densità del combustibile:	725 [kg/m ³]
Potere calorifico inferiore combustibile:	42000 [kJ/kg]
Tipo ciclo motore:	Ciclo Atkinson
Velocità idle:	700 [rpm]

La caratteristica di coppia e il consumo di combustibile è riportata in Fig. 3.2 .

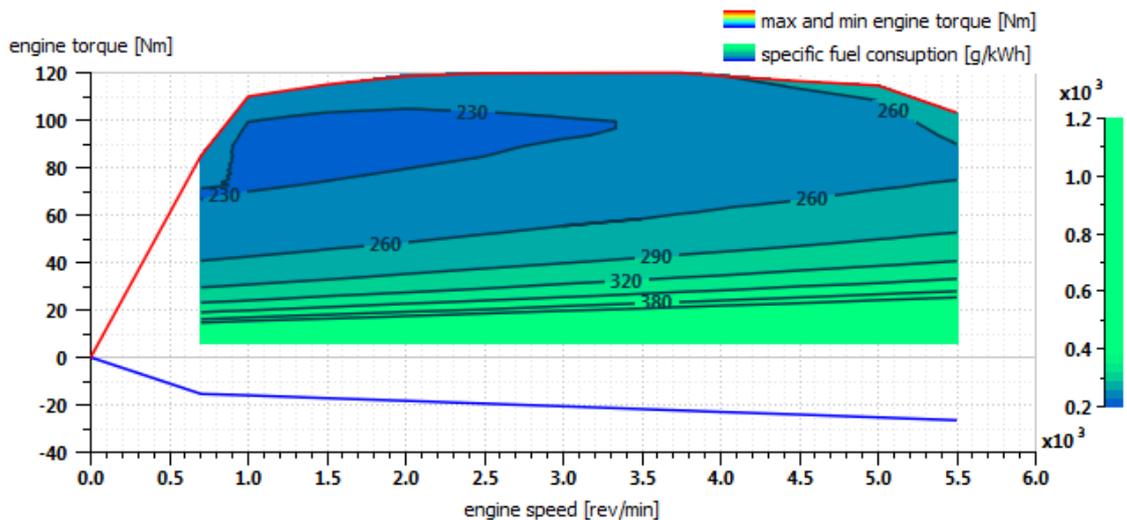


Fig. 3.2: Caratteristica di coppia ed consumo ICE.

La configurazione ibrida serie prevede l'utilizzo di un generatore che deve essere opportunamente connesso al motore termico. Esso è dimensionato in modo da avere una elevata coppia a bassi giri e permette dunque l'avviamento del motore ma anche trasformare energia meccanica del motore termico in energia elettrica per alimentare il motore elettrico o per lo stoccaggio in batteria. Di conseguenza si è dimensionato e scelto di utilizzare un generatore che avesse una caratteristica di coppia che permetta il miglior funzionamento del motore termico:

Coppia massima continuativa:	100 [Nm]
Coppia massima di picco :	115 [Nm]
Potenza massima continuativa:	57 [Cv] a 4000 [rpm]

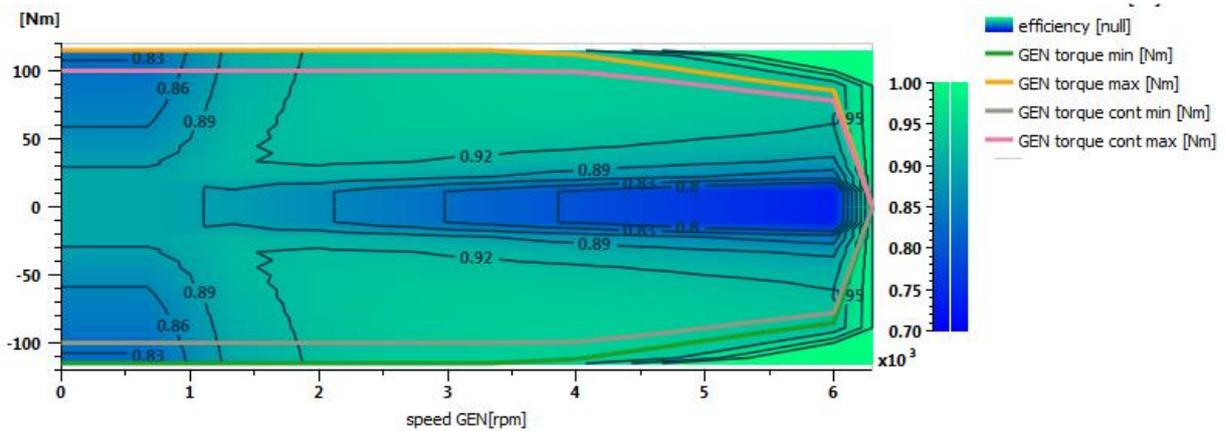


Fig. 3.3: Caratteristica di coppia ed efficienza GEN.

Il generatore essendo una macchina elettrica ovviamente presenta un elevato rendimento rispetto al motore termico quindi data la stretta connessione tra i due, il componente che bisogna necessariamente ottimizzare è il motore termico.

Lo studio che è stato fatto è quello di ricavare dalla caratteristica di coppia e consumo del motore termico dei punti di ottimo per estrapolare la curva dell' Economic line. Tali punti riportano in ascissa il numero di giri e in ordinata la coppia del motore ove il consumo di combustibile è il più basso possibile per il numero di giri selezionato. Il tool motore termico offre la possibilità di ricavare delle mappe, attraverso le quali, utilizzando fogli di calcolo, si ha la possibilità di ottenere tale curva. Riportiamo la curva Economic line sulla caratteristica del motore. Si vuole che il motore lavori in questi punti di minimo consumo.

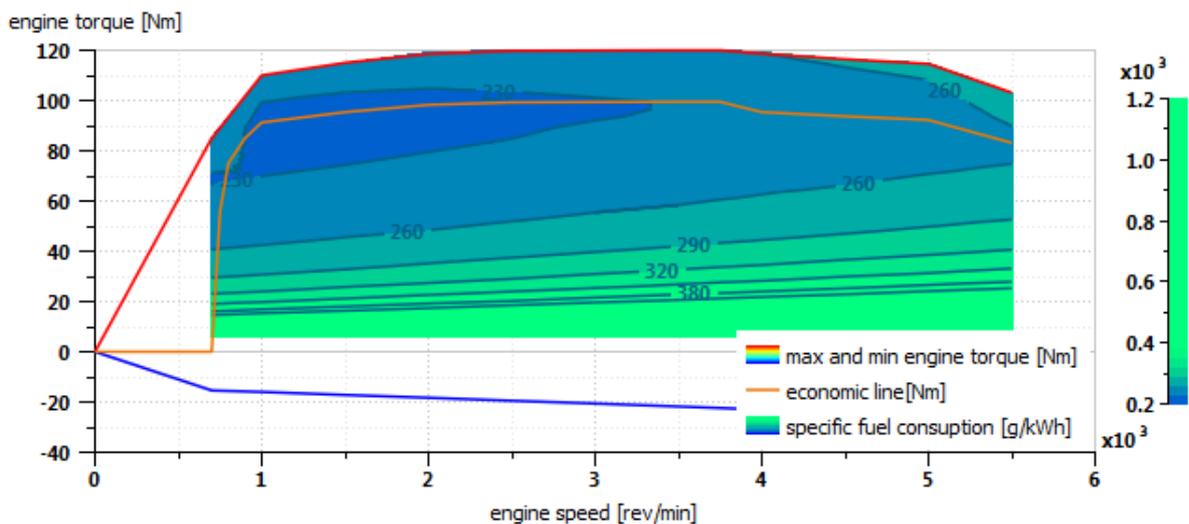


Fig. 3.4: Rappresentazione della Economic Line.

Dalla caratteristica, Fig.3.4, si nota che i punti migliori sono quelli fino ad un numero di giri di circa 3000 [rpm].

La caratteristica del generatore permette senza alcun problema di poter lavorare nei punti riportati avendo una caratteristica di coppia costante a 100 [Nm] fino alla velocità di 4000 [rpm] e un rendimento accettabile come si può notare dalla caratteristica riportata in Fig. 3.3.

Il motore elettrico MOT invece è il propulsore direttamente collegato alle ruote per cui esso deve essere dimensionato in modo garantire in maniera corretta la trazione del veicolo. È stato progettato una trasmissione e motore elettrico che fornisce una potenza massima alle ruote di circa 80 [Cv] e permetta al veicolo di raggiungere la velocità massima di 180 [km/h]. Il

procedimento si basa sull'intersezione della coppia resistente totale del veicolo in funzione della velocità dello stesso e la caratteristica del MOT riportata alle ruote, per cui ha un ruolo fondamentale anche la scelta dei rapporti di riduzione della trasmissione. La trasmissione è semplice e priva del cambio di velocità, per i motivi descritti del primo capitolo, per cui i valori sono fissi e pari ad:

Rapporto trasmissione ridosso motore termico/ generatore τ_g :	1
Rapporto trasmissione ridosso motore elettrico τ_M :	1.2
Rapporto trasmissione differenziale τ_D :	2.35

Un'analisi successiva vedrà l'utilizzo di un cambio a due rapporti per valutare il peso delle penalità del cambio marcia e della sua influenza sulla dinamica del veicolo.

Dai calcoli effettuati si è scelto di utilizzare un MOT che presenta le seguenti caratteristiche:

Coppia massima continuativa:	250 [Nm]
Coppia massima di picco :	300 [Nm]
Potenza massima continuativa:	170.97 [Cv] a 4800 [rpm]

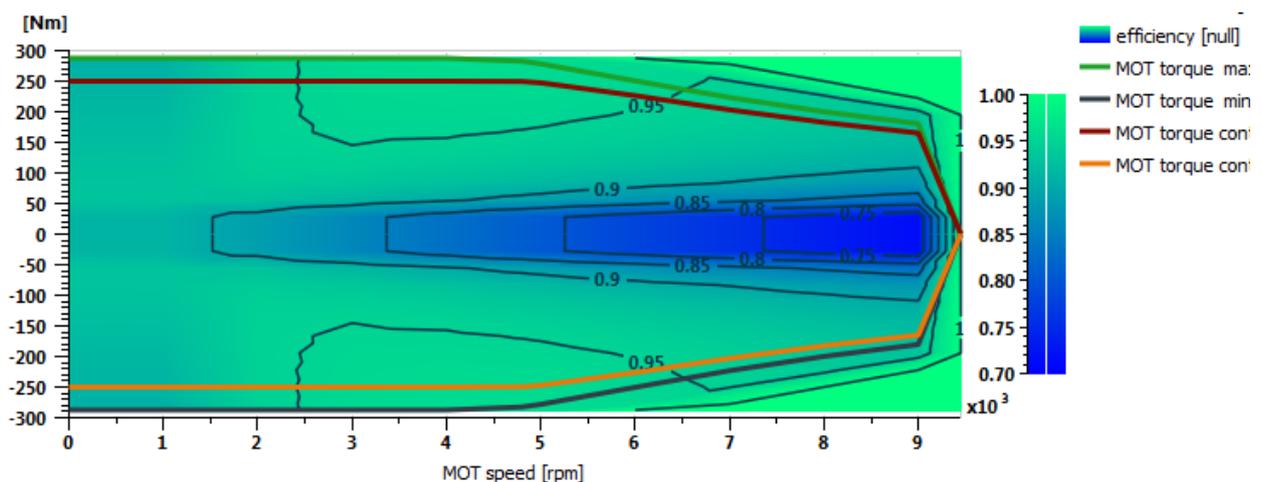


Fig. 3.5: Caratteristica di coppia ed efficienza MOT.

Per un confronto finale con altre architetture di veicoli ibridi è stato scelto di calcolare un fattore che indichi la quantità di potenza elettrica installata a bordo veicolo. Si tende dunque a precisare che in questo caso, essendo il motore termico svincolato dalle ruote, non vi sarà una somma di potenza dei due motori come è possibile farlo con l'architettura in parallelo per cui il motore elettrico deve essere dimensionato in modo da garantire la potenza massima alle ruote. Il generatore invece è dimensionato per garantire il corretto accoppiamento con il motore termico e facilitare l'utilizzo dello stesso nei suoi punti di ottimo. Dunque il fattore di ibridizzazione di tale veicolo è così determinato:

$$\text{fattore di ibridizzazione} = \frac{\text{Potenza Elettrica}}{\text{Potenza totale bordo veicolo}} = 73.93 \%$$

La percentuale è molto alta e questo fa che si che l'architettura serie ha una struttura che ricorda il veicolo elettrico puro.

L'alimentazione della componente elettrica è una batteria a ioni di litio molto comune sia nella industria automotive che in altre applicazioni, essa offre un'ottima densità di energia e una buona capacità di isteresi di ricarica. La batteria è uno degli elementi più rilevanti per un veicolo elettrico puro che ibrido e proprio la sua capacità di ricarica e accumulo della energia che caratterizza questi tipi di veicoli, ma anche uno dei più sensibili per via della sua dipendenza dalla temperatura e dalla profondità di carica. Il progresso in questo campo è un punto fondamentale nella stessa diffusione dei veicoli ibridi. La batteria utilizzata presenta queste caratteristiche:

n° di elementi in serie in un branch:	100
n° di branchs in parallelo:	1
Capacità della batteria:	80 [Ah]
Range accettabile di SOC (state of charge):	80-20 [%]
SOC iniziale:	65 [%]
Tensione batteria:	230 [V]
Efficienza di ricarica:	0.9 [-]

La curva in Fig. 3.6 descrive la dipendenza del DOD (Death of Discharge) con il voltaggio e la curva in Fig. 3.7 rappresenta le perdite interne in funzione del DOD.

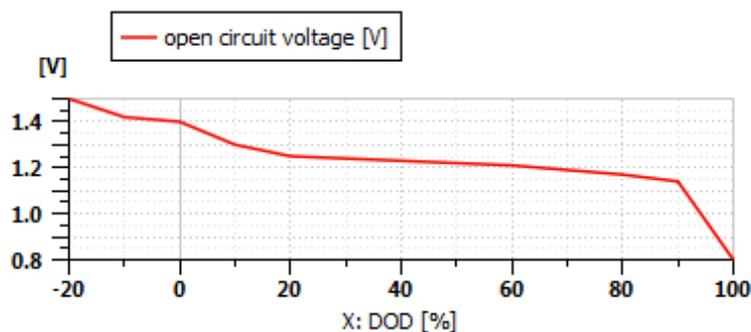


Fig. 3.6: Voltaggio in funzione del DOD.

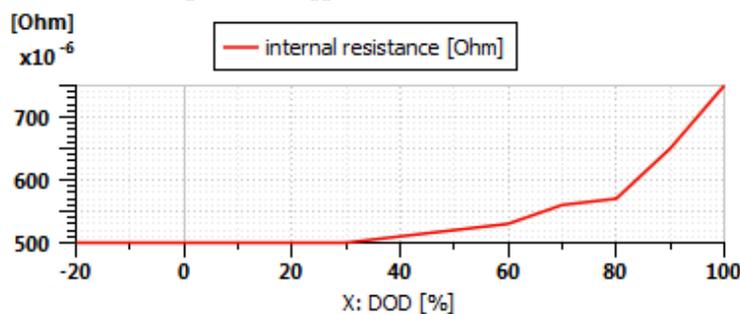


Fig. 3.7: Resistenza in funzione del DOD.

È importante notare come se SOC diminuisce la resistenza interna della batteria aumenta e le perdite interne tendono a salire. Dunque è strettamente necessario che l'algoritmo lavori per mantenere lo stato di carica più alto possibile.

Infine possiamo definire tutte le caratteristiche del veicolo che poi andranno a definire le forze di resistenza al moto, per coerenza tra le varie architetture sono stati utilizzati gli stessi

coefficienti anche negli altri modelli tranne che per il serie parallelo che presenta alcune modifiche:

Sezione frontale veicolo:	2 [m ²]
Coefficiente aereodinamica Cx:	0.3 [-]
Coefficiente di attrito f:	0.01 [-]
Larghezza pneumatico:	185 [mm]
Altezza pneumatico:	65 [%]
Diametro cerchio:	15 [in]
Inerzia ruota:	0.75 [kg m ²]
Massa totale veicolo:	1200 [kg]

Dopo aver effettuato la definizione dei parametri principali del veicolo possiamo spostare la nostra attenzione sulla definizione delle caratteristiche di driveability definendo allora alcune delle penalità di potenza che saranno considerate nell'algoritmo di ottimizzazione attraverso il tool HOT. Tali penalità comprendono l'avvio e lo spegnimento del motore, ogni qual volta che il motore termico viene azionato paghiamo in termini di potenza. Verrà definito anche il tempo affinché questa penalità sarà in atto. Inoltre vi saranno delle perdite dovute al cambio di marcia, ogni qual volta il driver comanda un cambio marcia vi sarà una dissipazione di potenza che andrà a ridurre la potenza complessiva. Queste strategie di driveability e tali penalità condizioneranno il numero di volte in cui sarà disponibile lo start and stop e il profilo di cambio marcia migliore.

Per questo tipo di veicolo abbiamo eseguito tre diverse logiche di driveability e abbiamo analizzato come il peso di queste penalità condiziona lo stato di carica, il consumo di combustibile e la coppia dei motori in uso. Tale analisi verrà ripresa ed esposta in seguito.

Le caratteristiche di driveability definite inizialmente sono:

Penalità per accensione motore termico:	500 [W]
Penalità per spegnimento motore termico:	200[W]
Penalità dovuta alla trasmissione e cambio marcia:	-
Tempo durante il quale la penalità dell'accensione motore rimane attiva:	4 [s]
Tempo durante il quale la penalità dello spegnimento motore rimane attiva:	2[s]

Data l'assenza del cambio di velocità non è possibile impostare una logica personalizzata di alternanza delle marcie, la trasmissione semplificata offre soltanto un unico e costante rapporto di trasmissione.

Nella sezione dedicata alla driveability si ha la possibilità di inserire i punti di ottimo del motore termico l'obiettivo di ridurre il consumo di combustibile e il tasso delle emissioni inquinanti in atmosfera. Di tutta la curva Economic line si sono scelti alcuni punti li dove il consumo di combustibile è il più basso possibile e quelli che presentano un numero di giri non eccessivamente grande fino a 3000 [rpm] . Dopo aver definito i parametri di tutti i componenti principali del veicolo e la strategia di guidabilità si passa alla definizione del ciclo guida. Attenendosi alle norme in vigore per le nostre simulazioni è stato scelto il nuovo ciclo guida WLTC, opportunamente per classe di veicolo. È stato deciso, in tutte le simulazioni, di

evitare di fissare il profilo di cambio di marcia lasciandolo come variabile nell'algoritmo di ottimizzazione, in questa architettura non abbiamo un cambio di velocità per cui tale parametro non verrà preso in considerazione. Per quanto riguarda la pendenza della strada è stato scelto di considerare la strada piana non sapendo il tipo di zona di percorrenza. La potenza destinata agli accessori elettrici è stata considerata crescente nel tempo, assimilabile ad una retta così rappresentata:

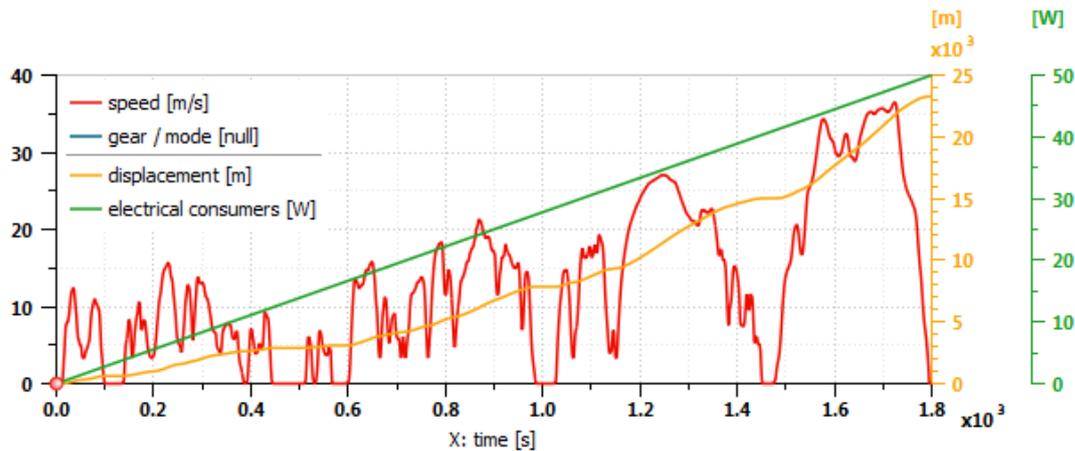


Fig. 3.8: Definizione del Ciclo guida, potenza destinata agli accessori e spazio percorso.

Il passo successivo è quello di andare a scegliere alcuni dei parametri utili per l'avvio della simulazione:

Computation sampling time:	0.5 [s]
Tolleranza sul SOC finale:	5 [%]
Massimo numero di iterazioni	50
Massimo valore di s (fattore di equivalenza):	2
Minimo valore di s (fattore di equivalenza):	4

Si è scelto di utilizzare un stato di carica della batteria pari al 65 % e si vuole che alla fine del percorso il veicolo abbia ancora uno stato di carica della batteria del 65 % in modo da poter effettuare un'analisi delle prestazioni e di coppia vincolato strettamente dallo stato della carica. Una filosofia diversa di analisi sarebbe stata quella di andare ad accettare un calo di stato di carica fuori dalla banda di accettabilità attorno al 65% se il veicolo fosse fornito di tecnologia plug-in, ove alla fine della corsa implica la ricarica della batteria allo stato di carica finale o superiore.

È importante notare il comportamento del fattore di equivalenza, nelle impostazioni sono definite i valori di minimo e massimo che rappresentano i limiti dell'intervallo di numeri da utilizzare come parametri candidati per l'ottimizzazione off-line. Il valore ottimale del fattore di equivalenza può essere trovato attraverso un'ottimizzazione sistematica solo se è noto il ciclo di guida. Quindi alla fine della simulazione otterremo un parametro di fattore di equivalenza statico come risultato del migliore split di coppia tra i motori con l'obiettivo di riduzione del consumo. Dalle prove effettuate si vedrà come il valore resterà costante dato che l'unico responsabile della trazione è il motore elettrico e il motore termico sarà utilizzato solo per produrre energia elettrica.

Per quanto riguarda i tempi di analisi è stato scelto un numero che ci permette di effettuare un'analisi accurata e una suddivisione degli intervalli di ricerca adeguati, anche per il tempo della simulazione.

Una prima analisi è stata fatta mantenendo il tempo di campionamento alto e poche iterazioni, capire se effettivamente l'algoritmo giungeva ad un valore di convergenza, in seguito è stato dimezzato il tempo e aumentato il numero di iterazioni con il fine di raggiungere un risultato e dei dati più attendibili.

La simulazione con le impostazioni descritte porta a convergenza. Riportiamo in basso i risultati ottenuti:

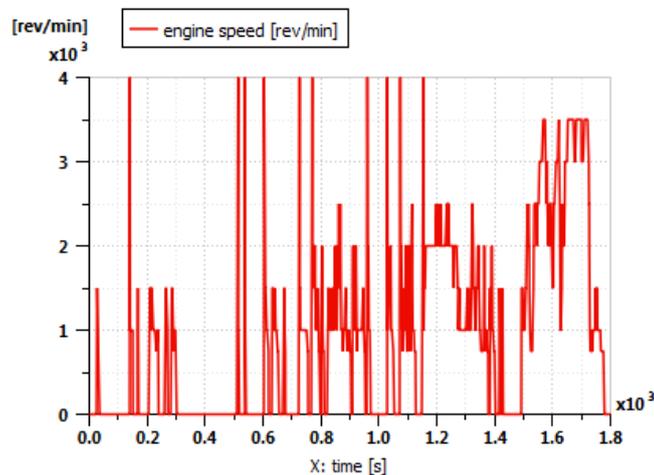


Fig. 3.9: Velocità ICE nel tempo.

Dal profilo di velocità, Fig. 3.9, si evince come per taluti periodi il motore termico resta spento e quindi la sua velocità è pari a zero. Durante le richieste di accensione esso viene portato alla velocità di ottimo per quell'istante.

Nei primi istanti del ciclo guida si hanno brevi accelerazioni e frenate gestite solo dal motore elettrico dunque il motore termico risulta spento, si assistono a dei picchi di velocità a 2000 o 4000 [rpm] in corrispondenza della richiesta di energia elettrica da parte del propulsore elettrico.

Nella parte centrale del grafico il motore termico viene avviato per poter ricaricare parte della batteria e destinare parte della potenza alla trazione con una velocità di circa 2000 e 2500 [rpm]. L'ultima parte del profilo riguarda la circolazione su un ciclo extraurbano e dunque il motore termico viene utilizzato per poter fornire energia alla trazione mediante la conversione in energia elettrica.

Tale profilo rappresenta la migliore strategia di attuazione del motore termico dettato dall'algoritmo, considerando le penalità sullo start and stop del motore termico. Il profilo di velocità del generatore è lo stesso del motore termico, i due sono vincolati strettamente e dimensionati in modo complementare.

Il profilo di velocità del motore elettrico, in Fig. 3.10, è diverso rispetto al profilo di velocità del motore termico.

Il motore elettrico è vincolato alle ruote dunque a meno di una costante avrà un profilo di velocità molto simile a quella imposta dal ciclo guida.

In questo tipo di simulazione non abbiamo la presenza di un driver e delle inerzie di ogni componente per cui la velocità del veicolo corrisponderà esattamente con il ciclo di guida impostato.

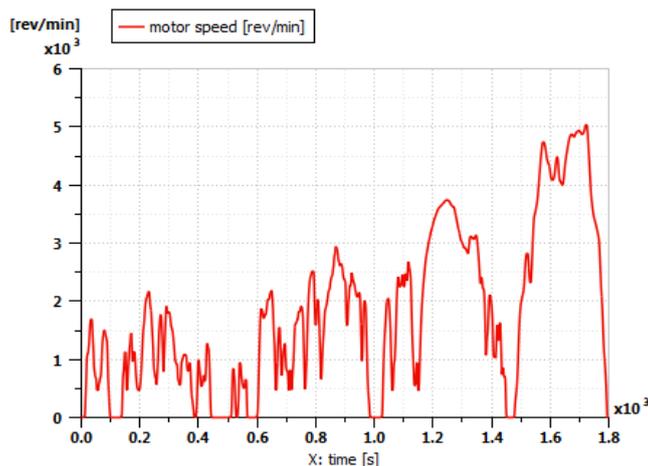


Fig. 3.10: Velocità MOT nel tempo.

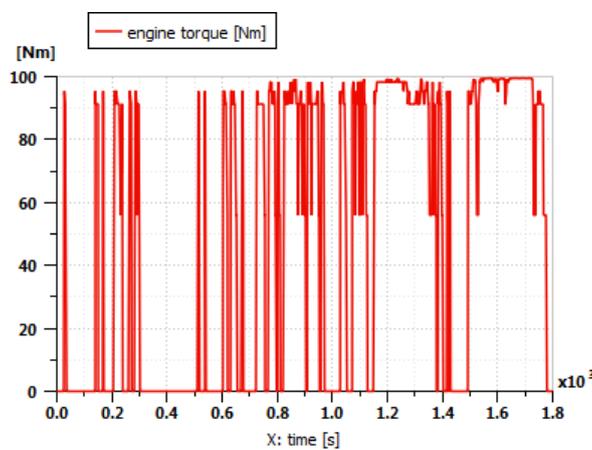


Fig. 3.11: Coppia ICE nel tempo.

Il profilo di coppia dimostra come il motore termico è portato a lavoro ai punti di ottimo impostati nello step di selezione delle penalità di driveability. La curva della coppia nel tempo del generatore è la stessa di quella del motore termico dato che i punti di ottimo a cui lavora il motore si trovano all'interno della caratteristica di coppia del generatore.

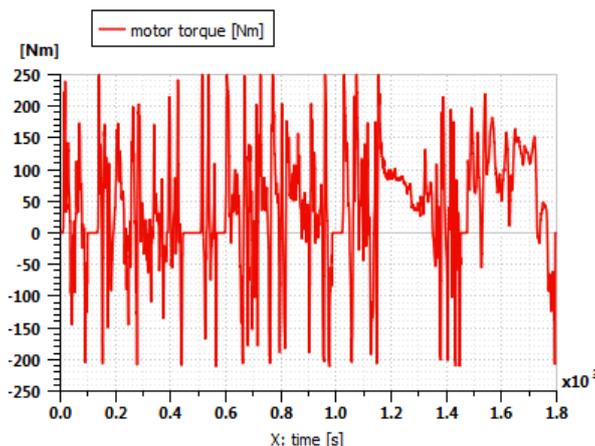


Fig. 3.12: Coppia MOT nel tempo.

Il profilo di coppia del motore elettrico nel tempo è molto più frastagliato rispetto al regolare andamento del motore termico/generatore. Possiamo subito notare una parte positiva e una negativa. La parte positiva è la risposta alle richieste di accelerazione del nostro veicolo e ciò

che è responsabile della trazione. La parte negativa ci mostra che il motore elettrico lavora da generatore, dunque parte di quella coppia negativa sarà utilizzata per la ricarica della batteria, entrando in modalità frenata rigenerativa.

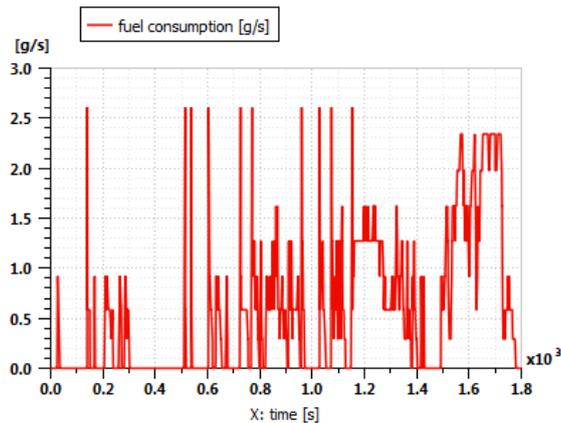


Fig. 3.13: Consumo di combustibile nel tempo.

Il profilo del consumo di combustibile nel tempo è molto schematico proporzionale alla velocità e risultato della logica di driveability e dei punti di funzionamento inseriti.

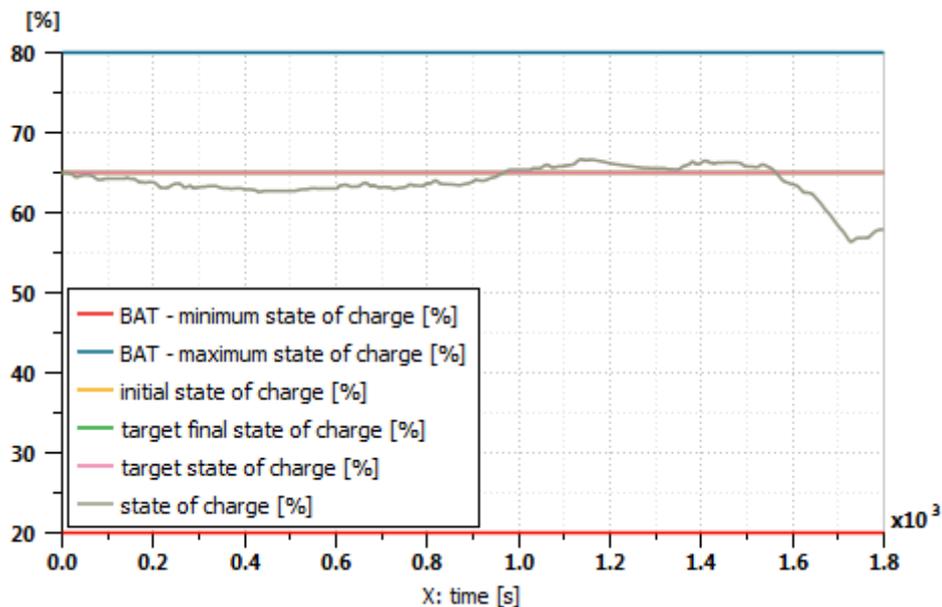


Fig. 3.14: Andamento stato di carica della batteria.

Il grafico riporta l'andamento dello stato di carica della batteria. Si nota che la curva in tutto il tempo della simulazione si mantiene all'interno del range di SOC ottimo per la batteria 80-20 % per evitare il danneggiamento per sovraccarica o sottocarica. Per strategia è stato richiesto un livello di SOC finale uguale a quello iniziale, se fosse stato un plugin sarebbe stato utile considerare anche un SOC molto inferiore considerando la possibilità di ricarica della batteria a fine corsa. L'algoritmo va a convergenza e lo stato di carica finale si mantiene all'interno della tolleranza del 7% scelta in precedenza, con uno stato di carica del 58 %. In tutto l'andamento il valore del SOC non si discosta oltre il 70 % e al di sotto del 55 %.

La potenza totale richiesta dal power train può essere data in parte dalla batteria e in parte dal combustibile ovvero motore termico. La potenza data dalla batteria è comunque una parte

della potenza equivalente spesa virtualmente dal motore termico, per via della ricarica.

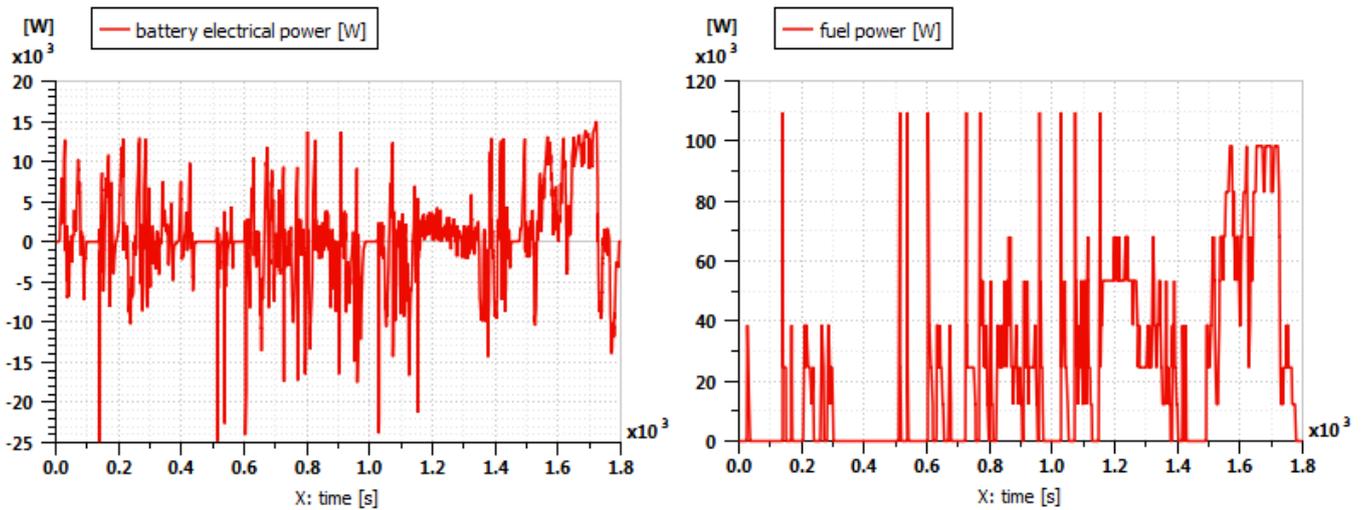


Fig. 3.15: Sinistra: andamento della potenza richiesta dalla batteria, a destra: potenza dovuta al combustibile.

La Fig.3.15 mostra l'andamento della potenza richiesta dalla batteria per la trazione del power train a sinistra e potenza richiesta al motore termico e quindi dovuta all'utilizzo del combustibile fossile a destra.

La Fig.3.16 riporta i punti di funzionamento del motore sulla caratteristica dell'ICE mostrando dunque attraverso la dimensione dei pallini la frequenza in di utilizzo del punto di lavoro del motore termico. Dal grafico si evince come il motore termico lavora il meno possibile perché la dimensione del pallino sull'origine è maggiore rispetto agli altri. Il punti di funzionamento del motore coincidono con i punti di ottimo inseriti, la dimensione dei pallini è più piccola nella prima parte della E line e nella parte finale, il motore termico viene utilizzato nell'area a più basso consumo e alta efficienza.

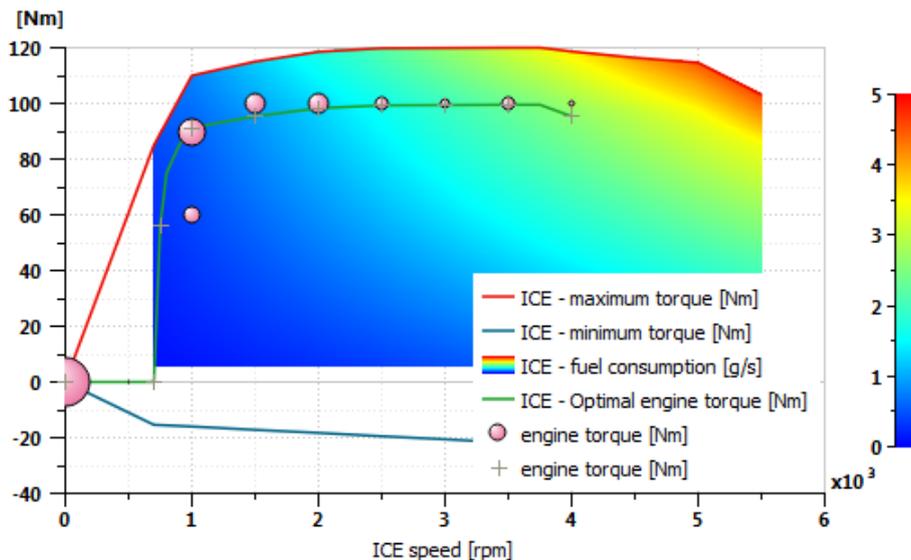


Fig. 3.16: Punti di funzionamento ICE.

La Fig.3.17 mostra invece i punti di funzionamento del generatore accoppiato con il motore termico, sono gli stessi del motore termico. La caratteristica riportata è riferita alla macchina elettrica nella convenzione come generatore e coppia positiva. Si evince il corretto dimensionamento della macchina elettrica e la giusta correlazione con ICE. Quello riportato è

la caratteristica di coppia continuativa, li dove le richieste dovrebbero essere superiori si ha ancora coppia a sufficienza per un certo tempo limitato.

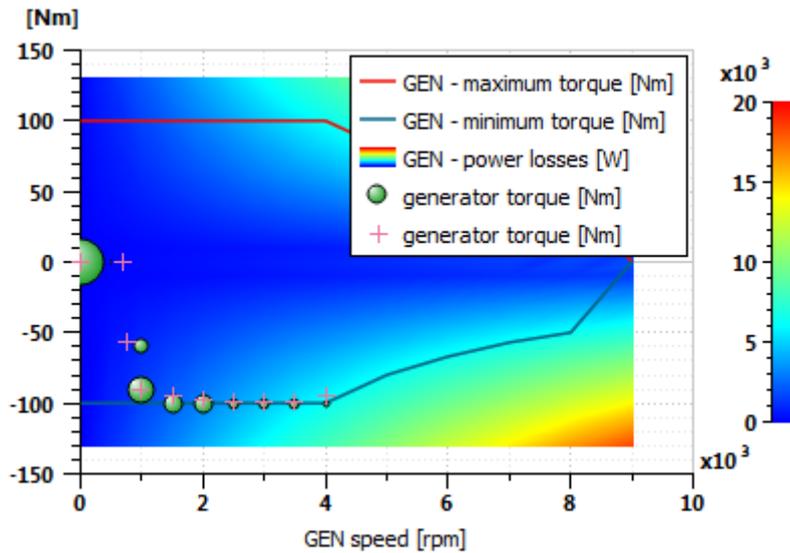


Fig. 3.17: Punti di funzionamento GEN.

Per completezza riportiamo anche i punti di funzionamento del motore elettrico MOT . Si nota che il motore elettrico lavora a bassi giri ed ad alte coppie in una zona a rendimento accettabile ma non massimo. Il motore ha la possibilità di arrivare ad una velocità di circa 9000 [rpm], ma non raggiunge la sua velocità massima per il ciclo guida selezionato. Una miglioria che si potrebbe fare è scegliere un motore MOT che presenti una caratteristica a coppia costante fino ad un numero di giri minore in modo da fare lavorare il una zona a più alta. Questa operazione non è stata fatta perché limiterebbe la frenata rigenerativa ad alto numero di giri a causa della saturazione della coppia per cui per un giusto compromesso si è deciso di adottare la seguente configurazione.

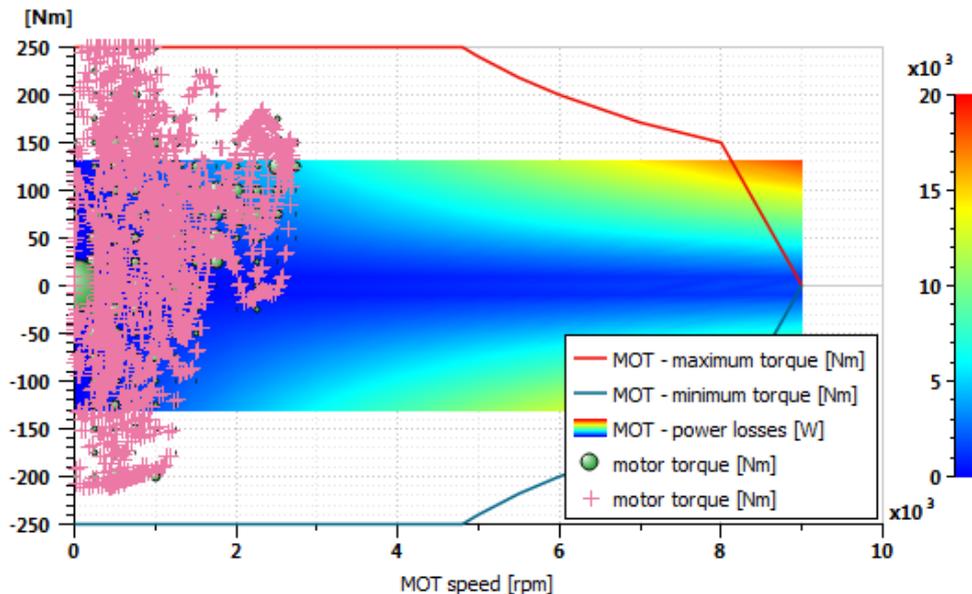


Fig. 3.18: Punti di funzionamento MOT.

Dai risultati ottenuti dalla simulazione di particolare importanza è il consumo di combustibile pari a circa 5.90 [l/(100 km)] considerando l'interno ciclo WLTP. L'aumento del consumo è dovuto a un modesto utilizzo del motore termico nella parte extraurbana. Questo ci permette di dire che un ibrido serie può essere molto vantaggioso su ciclo urbano, invece nell'area extraurbana ai consumi di combustibile sono da sommare anche un ingente perdita di potenza nelle fasi di trasformazione della energia.

3.2 *Analisi con diverse metriche di driveability*

Con l'obiettivo di analizzare come una diversa strategia di driveability pesa sui risultati sono state eseguite tre analisi differenti, la prima discussa in precedenza, la seconda senza le penalità di accensione e una terza simulazione considerando una condizione molto dissipativa. Le logiche scelte sono riportate in Tabella 3.1.

	1° simulazione	2° simulazione	3° simulazione
Penalità per accensione motore termico:	500 [W]	0 [W]	5000 [W]
Penalità per spegnimento motore termico:	200 [W]	0 [W]	700 [W]
Penalità dovuta alla trasmissione e cambio marcia:	-	-	-
Tempo durante il quale la penalità dell'accensione motore rimane attiva:	4 [s]	0 [s]	5 [s]
Tempo durante il quale la penalità dello spegnimento motore rimane attiva:	2[s]	0 [s]	3 [s]

Tabella 3.1: Penalità per tre diverse simulazioni.

Avviando le simulazioni si sono ottenuti dei risultati non molto differenti alla prima analisi, la curva dello stato di carica della batteria è sostanzialmente identico e le differenze possono essere ritenute trascurabili.

Il motore termico si avvia quasi nei stessi punti della prima analisi per tutte le tre logiche e lo stesso numero di volte.

Il fattore di equivalenza resta uguale per le tre simulazioni e il consumo di combustibile resta circa uguale. In questa configurazione molto semplice il motore termico viene avviato solo nelle condizioni in cui è necessario qualunque sia la penalità sulla accensione e spegnimento. Nelle configurazioni più complesse che vedremo in seguito, noteremo dunque come queste penalità andranno a modificare sostanzialmente i grafici rispetto ad una situazione iniziale.

3.2.1 *Analisi sulla penalità, veicolo munito di cambio di velocità*

Una analisi interessante sarebbe quella di utilizzare il medesimo veicolo con l'aggiunta di un cambio di velocità a ridosso del motore elettrico di trazione. Con l'aggiunta del cambio di velocità mantenendo tutto il resto inalterato lo schema diventa:

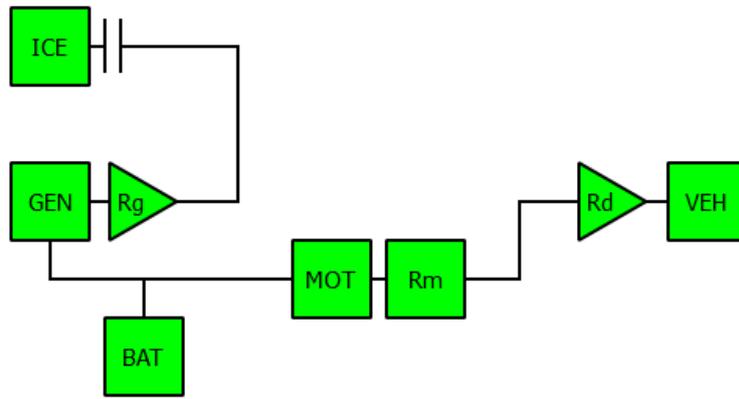


Fig. 3.19: Architettura ibrida serie con aggiunta di un cambio di velocità a ridosso del MOT.

Il blocco Rm rappresenta il cambio di velocità a due rapporti inserito a ridosso del motore elettrico avente come rapporti di trasmissione:

	Numero	Efficienza
Rapporto trasmissione prima marcia	1.5	0.95
Rapporto trasmissione seconda marcia	1	0.98
Rapporto trasmissione differenziale:	2.35	0.97

L'introduzione di un cambio di velocità permetterà introdurre delle penalità sul cambio di marcia e di ottimizzare il profilo di marcia del veicolo.

Si è scelto di analizzare tre situazioni, una ritenuta intermedia, la prima. Una seconda priva di penalità e una terza con il caso più peggiorativo, Tabella 3.2 .

	1° simulazione (color rosso)	2° simulazione (color blu)	3° simulazione (color giallo)
Penalità per accensione motore termico:	500 [W]	0 [W]	5000 [W]
Penalità per spegnimento motore termico:	200 [W]	0 [W]	700 [W]
Penalità dovuta alla trasmissione e cambio marcia:	1400 [W]	0 [W]	2500 [W]
Tempo durante il quale la penalità dell'accensione motore rimane attiva:	4 [s]	0 [s]	5 [s]
Tempo durante il quale la penalità dello spegnimento motore rimane attiva:	2[s]	0 [s]	3 [s]

Tabella 3.2: Penalità per tre diverse simulazioni.

I risultati ottenuti dalla simulazione sono riportati :

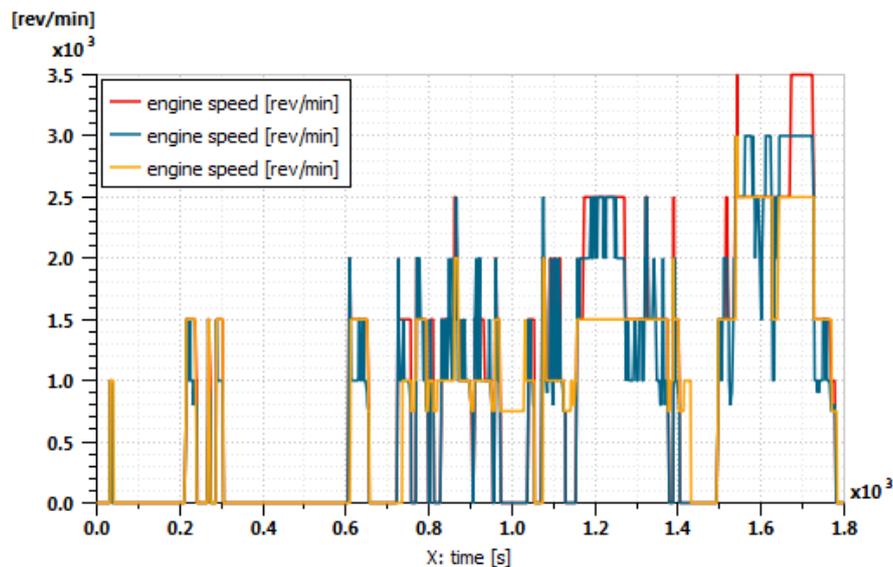


Fig. 3.20: Velocità ICE per le tre simulazioni.

A differenza del primo caso l'introduzione del cambio di velocità è una variabile in più che condiziona la velocità del motore termico come è possibile notare dalla Fig. 3.20 . La curva in blu, condizione priva di penalità, presenta molti più picchi di velocità, il motore termico verrà avviato più spesso della condizione peggiorativa e si avranno 21 accensioni e spegnimenti. Si evince specie nella parte centrale del grafico un incremento delle volte in cui il motore termico viene spento e riavviato in quanto la penalità di accensione e motore e spegnimento è nulla. La curva gialla invece, presenta un attivazione limitata del motore termico per la più elevata quantità di perdita al suo avvio e spegnimento. La condizione intermedia, in rosso risulta coperta dalla curva gialla, tranne per alcuni tratti in prossimità dei 300 [s] e della parte finale del ciclo ad alta velocità. Inoltre il numero di accensioni e spegnimenti è uguale e pari a 14 volte in entrambi i casi.

La velocità del motore elettrico responsabile della trazione varia poco nelle tre simulazioni si è omesso di riportare l'andamento completo. In linea di massima, la curva gialla e rossa a meno di pochi punti risultano essere uguali, per quanto riguarda la condizione priva di penalità si assiste spesso a dei picchi di velocità dovuto ai transitori di cambio marcia molto frequenti.

Per quanto riguarda l'andamento temporale della coppia del motore termico, per i motivi descritti nella figura che mostrava l'andamento della velocità, ci saranno delle differenze dettate esclusivamente dal numero di accensione del motore. Il motore raggiunge una coppia di circa 100 [Nm] secondo la curva di ottimo. La richiesta di coppia del motore elettrico varia in base al rapporto di marcia inserito potremmo avere una certa coppia positiva disponibile per la trazione ma anche negativa per la funzione frenata rigenerativa.

La curva priva di penalità ha un profilo di cambio marcia molto fitto che sarà causa di picchi di coppia. Il profilo intermedio e peggiorativo sono circa uguali e le curve risultano circa sovrapposte.

Ciò che è veramente importante è l'andamento dello stato di carica rispetto al caso precedente privo di cambio di velocità. Nelle tre simulazioni a differente penalità si hanno profili di stato di carica differente. Si nota una grossa discordanza tra la curva priva di penalità e quelle con le penalità intermedia e maggiore. Per le curve gialla e rossa i profili appaiono come traslati, tranne per alcuni istanti iniziali, e disposti con un SOC finale maggiore per il veicolo con minori penalità e man mano che la potenza persa per il cambio marcia e

accensione/spengimento motore si accentuano, il valore di SOC finale per il caso a penalità intermedie è di circa 65% per alta penalità è di 57 %.

La curva in blu presenta un andamento differente non supera il 66%, l'assenza delle penalità portano non solo all'accensione più frequente del motore termico ma anche alla selezione della marcia migliore. Il motore termico viene azionato e spento più frequentemente, esso funziona solo nell'occorrenza e per brevi periodi, questo consente di avere un ripristino dello stato di carica differente dagli altri casi e più lento, utilizzando maggiormente l'energia in batteria.

Quando le penalità sono più alte, il motore viene azionato poche volte ma funziona per un periodo di tempo superiore e mentre è in funzione ripristina lo stato di carica per cui le curve precedenti hanno un andamento dello stato di carica più alto. Il valore dello stato di carica finale è accettabile pari al 58%, valore intermedio tra le due soluzioni.

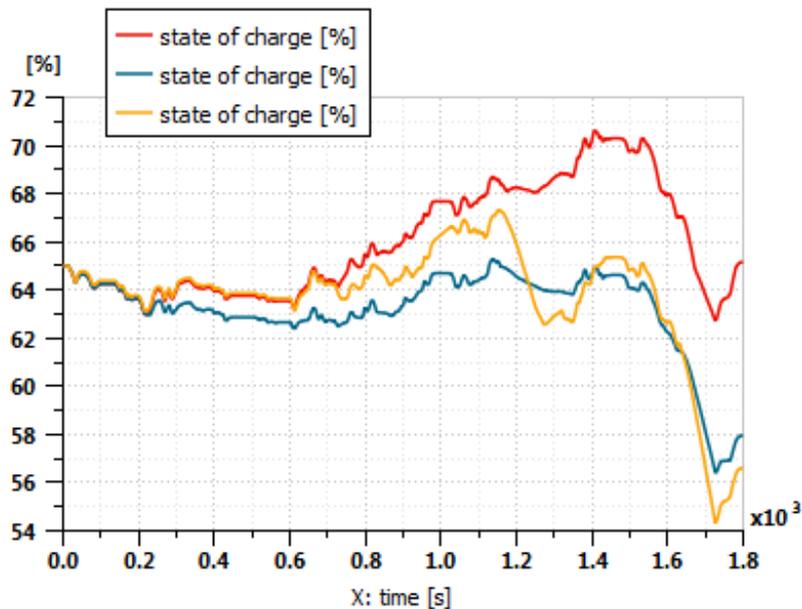


Fig. 3.21: Andamento stato di carica della batteria per le tre simulazioni.

L'andamento del fuel consumption varia in funzione dell'utilizzo del motore e possiamo dunque affermare le stesse considerazioni fatte dal profilo di velocità del motore termico. La curva con penalità intermedia viene coperta dalla curva a penalità maggiore. Allora è di facile interpretazione dire che se il motore termico è azionato un numero di volte maggiore avrà di conseguenza un più alto consumo di combustibile, si notano dei picchi di consumo in corrispondenza dell'azionamento.

Il grafico in Fig. 3.22 mostra una marcata differenza tra le curve. La curva blu corrispondente ad una penalità nulla sul cambio marcia, mostra di conseguenza la possibilità di avere un fitto cambio di marcia il quale si adatta in modo opportuno alla richiesta di coppia e alla frenata rigenerativa, eseguendo circa 70 cambi di marcia.

La curva rossa è completamente coperta dalla curva gialla, ma si afferma avere una rappresentazione meno fitta rispetto al profilo blu, circa 56 cambi. Tale curva gialla rappresenta il miglior profilo di cambio marcia dove le penalità gravano maggiormente ed è curioso notare che non viene selezionata la marcia più bassa.

Come si è visto dai risultati la logica del cambio marcia condiziona in modo evidente la coppia, la frenata rigenerativa e velocità del motore elettrico di trazione.

L'adozione del cambio marcia porta con la giusta quantità di penalità ad un maggior utilizzo della frenata rigenerativa dato che le curve di caratteristica di coppia del motore elettrico vengono traslate verso numero di giri più alti, e dunque una più rara saturazione di coppia

durante la frenata rigenerativa.

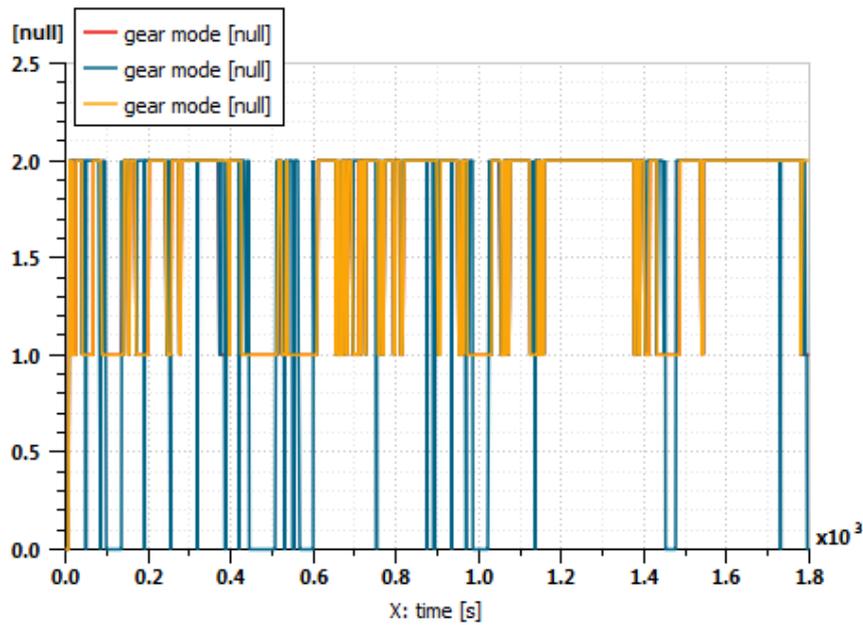


Fig. 3.22: Andamento del cambio di marcia per le tre simulazioni.

Nelle tre simulazioni il fattore di equivalenza ottimo è variabile e quindi varia il peso della potenza elettrica su quella del combustibile.

L'utilizzo del cambio di velocità porta ad un miglioramento del consumo di combustibile corretto, seppur minimo.

	1° simulazione (color rosso)	2° simulazione (color blu)	3° simulazione (color giallo)
Fattore di equivalenza s :	3.375 [-]	3.25 [-]	3.25 [-]
Consumo di combustibile:	5.51 [l/100km]	4.86 [l/100km]	4.85 [l/100km]
Consumo di combustibile corretto:	5.49 [l/100km]	5.43 [l/100km]	5.53 [l/100km]
Energia totale persa:	38.98 [MJ]	35.66 [MJ]	35.83 [MJ]
Efficienza MOT (motor)	0.943 [-]	0.942 [-]	0.942 [-]
Efficienza MOT (generator)	0.899 [-]	0.901 [-]	0.900 [-]
Efficienza GEN (motor)	0.881 [-]	0.882 [-]	0.881 [-]
Efficienza GEN (generator)	0.924 [-]	0.924 [-]	0.924 [-]
Efficienza ENG	0.375 [-]	0.375 [-]	0.376 [-]
Efficienza scarica BAT	0.973 [-]	0.975 [-]	0.968 [-]
Efficienza carica BAT	0.873 [-]	0.887 [-]	0.883 [-]

Tabella 3.3: Risultati delle tre simulazioni.

Dai risultati riportati in Tabella 3.3 possiamo dunque dire con certezza che un aumento della penalità porta seppur di poco, un peggioramento sul consumo di combustibile corretto.

Il cambio di velocità inserito ha soltanto due rapporti e il motore termico è svincolato dalle ruote dunque si decide di avviarlo solo in necessità e in modo performante dunque in conclusione possiamo dichiarare che le penalità e le logiche di driveability non pesano in modo eccessivo sul consumo di combustibile per questo primo tipo di configurazione.

Per quanto consegue, analizziamo i punti di funzionamento sulle caratteristiche delle tre macchine. Per quanto riguarda il generatore e del motore termico, c'è poco da aggiungere dato che esso lavora nei punti fissi dettati dai punti di ottimo, data la sua alta incidenza sul rendimento. I punti di funzionamento del motore elettrico nei tre casi sono condensati nella medesima zona infatti dai rendimenti in tabella non si assiste ad una variazione.

3.2.2 Analisi su ciclo WLTC ridotto

Inoltre per capire quanto può incidere la parte di ciclo extraurbana sul consumo di combustibile corretto è stato considerato il medesimo veicolo privo di cambio velocità e con logica di driveability riferita al primo caso, penalità intermedia, ed è stata eseguita una simulazione fino al tempo 1000 [s] considerando solo gli 8 [km] del ciclo urbano escludendo la parte ad alta velocità.

Una seconda simulazione è stata eseguita considerando a parità di spazio percorso la parte di ciclo extraurbana.

	WLTC Parte urbana	WLTC Parte extraurbana
Spazio percorso [km]	8	8
Consumo combustibile corretto [l/100km]	3.57	8.62

Tabella 3.4: Confronto consumi per percorso urbano e extraurbano.

Dai risultati delle simulazioni, Tabella 3.4, si può affermare che si ha un incremento dei consumi pari al 58.5 [%] se lo stesso veicolo (che viene utilizzato per 8 km su un percorso urbano) percorre altrettanti chilometri su un percorso extraurbano. Questo ci fa capire la limitazione dell'architettura serie in un percorso differente al ciclo urbano.

3.2.3 Analisi veicolo con ICE in downsizing e inserimento plug-in

Un'ultima analisi effettuata sulla architettura mediante il tool HOTS è quello di considerare il medesimo veicolo descritto, privo di cambio di velocità, con una riduzione della taglia del motore termico e generatore con l'inserimento, invece, di un sistema esterno di ricarica della batteria, il plug-in.

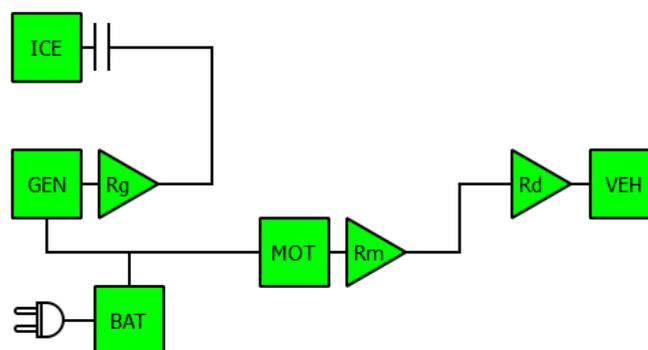


Fig. 3.23: Architettura veicolo ibrido serie con opzione plug-in.

Per questa analisi si è utilizzato un motore termico avente le seguenti caratteristiche:

Coppia massima:	55 [Nm] a 3750 [rpm]
Potenza massima:	38 [Cv] a 5000 [rpm]
Cilindrata:	0.647[l]
Numero di cilindri:	2
Numero di valvole per cilindro:	4
Densità del combustibile:	725 [kg/m ³]
Potere calorifico inferiore combustibile:	42000[kJ/kg]
Tipo ciclo motore:	Ciclo Atkinson
Velocità idle:	700 [rpm]

Inoltre in Fig. 3.24 è riportata la caratteristica di coppia, consumo ed i punti della curva Economic line.

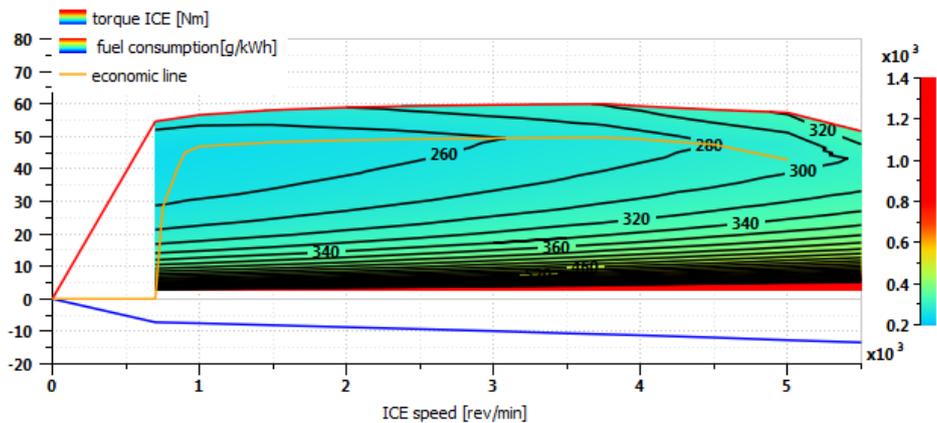


Fig. 3.24: Caratteristica di coppia e consumo specifico ICE.

In seguito si è scelto opportunamente un generatore che permetta di far lavorare ICE nei suoi punti di ottimo. Tale macchina elettrica presenta le seguenti caratteristiche:

Coppia massima continuativa:	60 [Nm]
Coppia massima di picco :	72 [Nm]
Potenza massima continuativa:	34.19 [Cv] a 4000 [rpm]

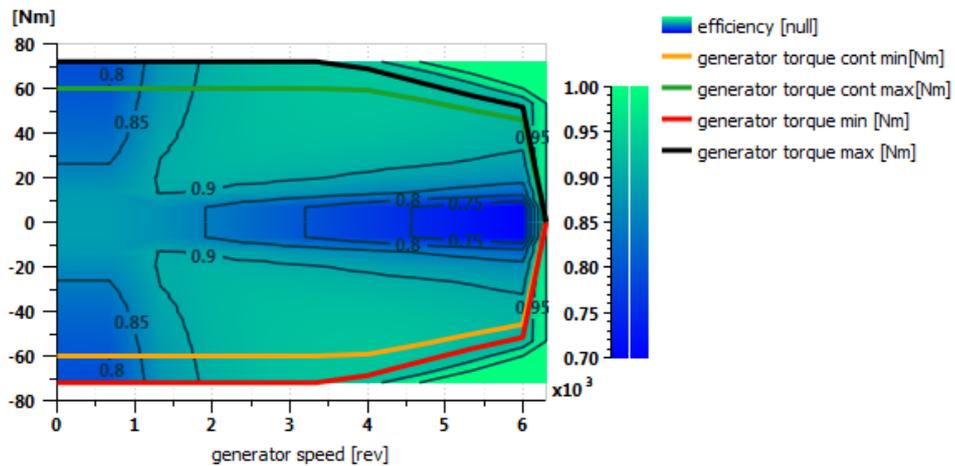


Fig. 3.25: Caratteristica di coppia e rendimento GEN.

Il motore elettrico per la trazione viene lasciato identico. Anche in questo caso privo di un cambio di velocità, il valore di penalità sull'accensione del motore non fanno variare la sua accensione come nella prima analisi effettuata. È invece utile analizzare come l'inserimento di un motore di taglia più bassa produce una riduzione dei consumi di combustibile e l'incidenza sullo stato di carica della batteria.

I risultati della simulazione mostrano che il consumo specifico corretto medio, considerando l'intero ciclo WLTC, è pari a 3.07 [l/100km]. Rispetto alla architettura vista in precedenza si ha un riduzione del consumo pari al 48 [%]. A fronte di questo di dovrà accettare uno stato di carica finale al di fuori di un range accettabile attorno al valore iniziale del 65 [%]. Questo implica come si nota dalla Fig. 3.26 che lo stato di carica del veicolo alla fine del ciclo sarà poco più del 35 [%]. Quindi questa configurazione necessita della ricarica del veicolo alla fine del proprio ciclo di guida, altrimenti, esso non sarà in grado di effettuare un successivo ciclo di guida. Per tale simulazione si è inserito un valore di target SOC finale pari al 45 [%] perché l'ipotesi della ricarica del veicolo alla fine della corsa ci svincola dal dover ritrovare lo stesso valore di SOC iniziale.

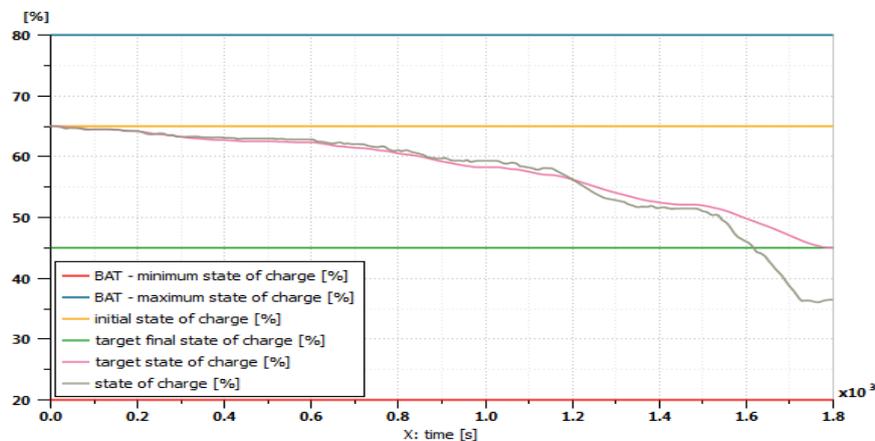


Fig. 3.26: Andamento dello stato di carica della batteria.

3.3 Simulazione e ottimizzazione del veicolo su strada

L'ottimizzazione effettuata in precedenza è stata realizzata mediante una simulazione off-line, ovvero una simulazione ideale del veicolo senza tenere conto della dinamica e delle inerzie presenti durante il suo funzionamento. Infatti il veicolo percorre esattamente il ciclo guida selezionato, dato che è stato imposto a priori, senza che ci sia un driver con i suoi tempi di risposta. La convergenza della simulazione implica dunque che il veicolo è stato in grado di percorrere il ciclo impostato e il livello di carica rimane all'interno di un intervallo preselezionato.

Nella simulazione su strada viene selezionato un ciclo di guida che il veicolo deve cercare di rispettare, viene utilizzato lo stesso che è stato impostato per il tool HOT, e sono state eseguite analisi di inseguimento della velocità, mettendo in evidenza i transitori di frenata e accelerazione.

Il tool HOT rappresenta uno strumento molto utile e ci da possibilità di generare uno sketch del modello simulato in precedenza, ovvero un modello di veicolo di partenza formato dei principali sotto modelli impostati, ma ancora incompleto. Infatti a questo sono stati aggiunti blocchi indispensabili come centralina e driver.

Il modello incompleto generato è stato opportunamente costruito e reso conforme per effettuare la simulazione temporale, esso è così costituito:

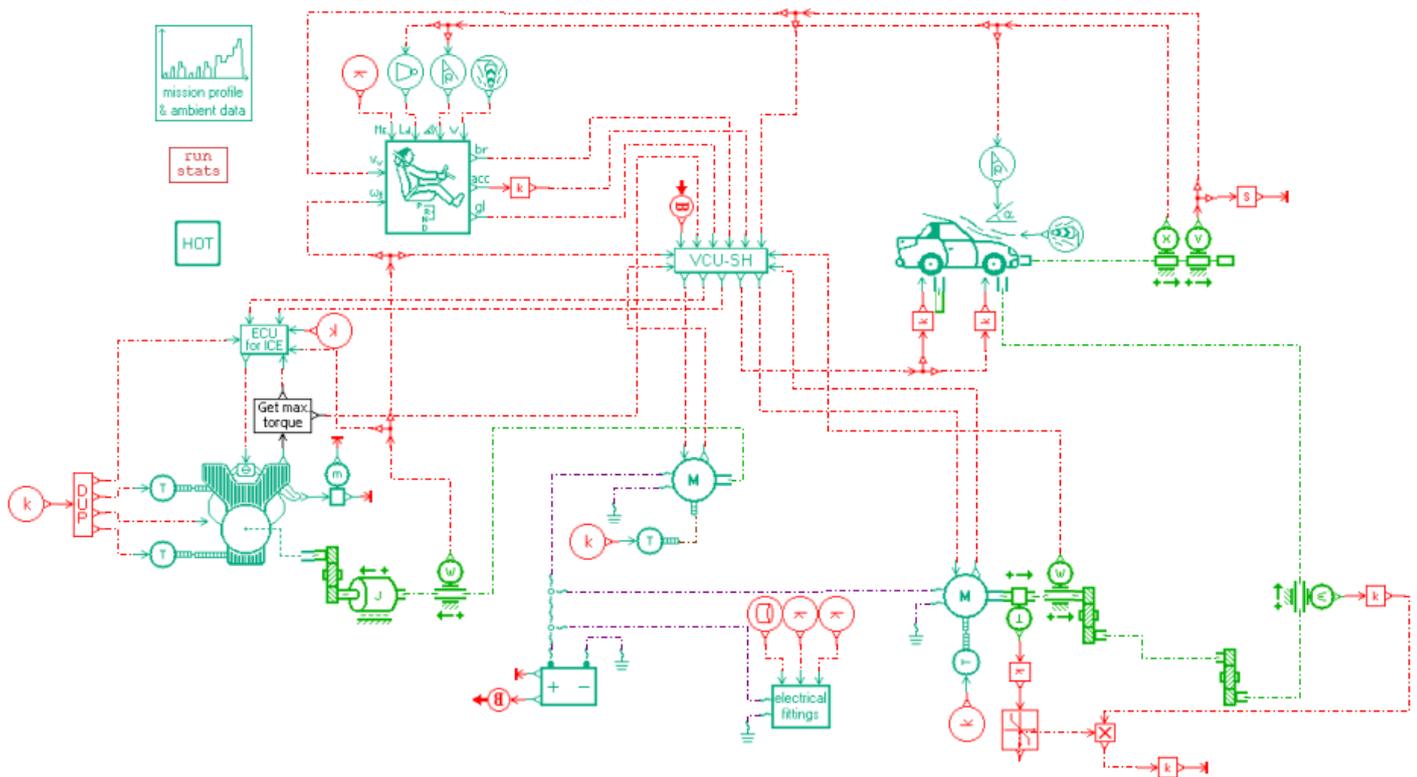


Fig. 3.27: Modello sviluppato di veicolo ibrido serie.

Il modello riportato è principalmente costituito da sotto modelli principali, alcuni discussi nel paragrafo precedente:

- Motore termico;
- Driver;
- Vehicle index;
- Motore elettrico/ Generatore;
- Pacco batterie;
- Missione profilo;
- Centralina veicolo VCU-SH;
- Controllo motore termico ECU.

Vi sono anche sotto modelli secondari:

- Riduttori di velocità;
- Sensori di velocità, velocità angolare e coppia;
- Blocchi per operazioni logiche;
- Blocchi per segnali;
- Sistema di ramificazione per il collegamento tra i vari sotto modelli.

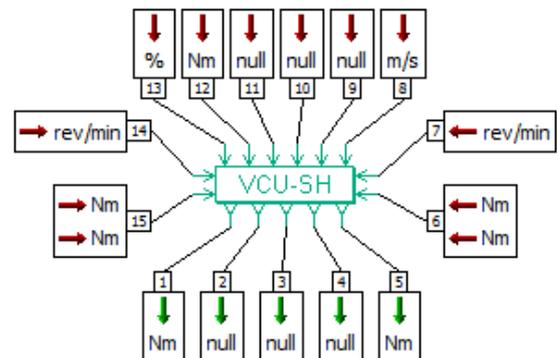
Come è possibile notare dallo schema il modello ha un grado complessità maggiore rispetto al tool HOT. Ogni componente riportato può essere modificato a dovere, cercando e ottenendo la migliore soluzione per una buona guidabilità e allo stesso tempo risparmio di combustibile.

3.3.1 VCU-SH

La parte centrale del modello è governata dalla centralina VCU-SH (Vehicle Control Unit for a Series Hybrid). Tale sotto modello è il risultato di una modello matematico di ottimizzazione euristica che segue una logica basate su leggi.

Segnali in ingresso:

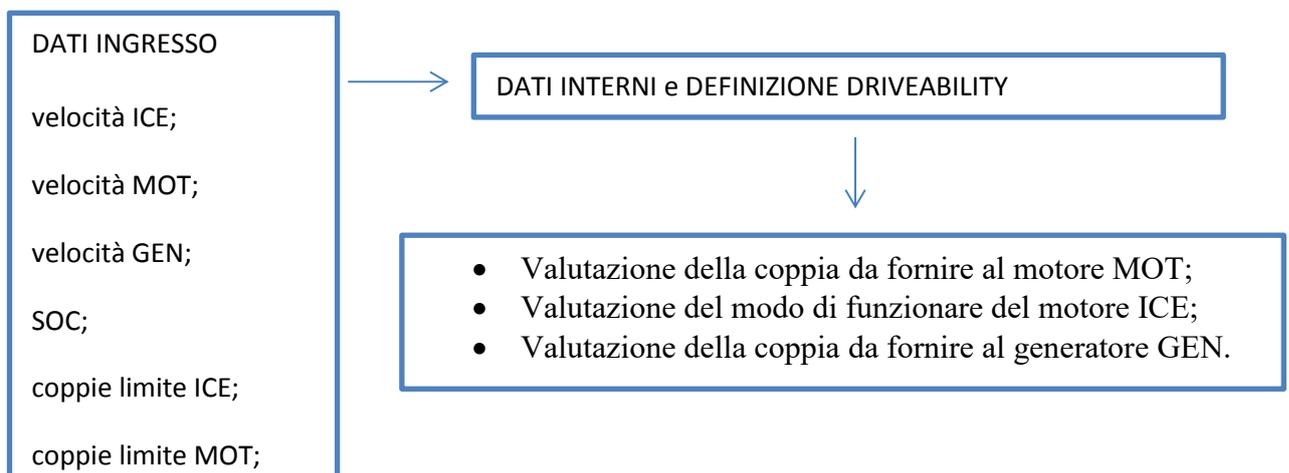
- Porta 6 Coppia massima e minima motore elettrico;
- Porta 7 Velocità di rotazione motore elettrico;
- Porta 8 Velocità veicolo in retroazione;
- Porta 9 Segnale di comando accelerazione driver ;
- Porta 10 Segnale di comando frenata driver ;
- Porta 11 Profilo di cambio marcia driver;
- Porta 12 Massima coppia motore termico;
- Porta 13 Percentuale SOC in arrivo dalla batteria;
- Porta 14 Velocità di rotazione motore termico;
- Porta 15 Coppia massima e minima generatore;



Segnali in uscita:

- Porta 1 Comando coppia generatore;
- Porta 2 Comando coppia motore termico;
- Porta 3 Comando accensione motore termico;
- Porta 4 Comando coppia di frenata;
- Porta 5 Comando coppia motore elettrico;

L'unità di controllo riceve informazioni dal sotto modello Driver (comandi di accelerazione e di frenata), il motore elettrico e il generatore (velocità di rotazione), la batteria (stato di carica e tensione) e la velocità del veicolo. Li analizza al fine di ridurre il consumo del combustibile, ma che permetta anche di mantenere uno stato di carica della batteria accettabile. Il motore elettrico potrebbe essere utilizzato come generatore per caricare la batteria quando il conducente frena. Se la potenza richiesta alla batteria è importante, il motore viene avviato con il generatore elettrico e raggiunge la sua velocità di rotazione ottimale per minimizzarne il consumo. L'unità di controllo fornisce informazioni al motore elettrico e al generatore, al sistema di frenata del veicolo e al motore.



Vi sono quattro parametri da definire per descrivere l'architettura del sistema:

- Coppia frenante massima per il veicolo: questo parametro deve essere impostato sullo stesso valore del parametro del veicolo;
- Rapporto di trasmissione tra il motore elettrico e il veicolo;
- File per la velocità di rotazione ottimale del motore: questo file (formato 1D) fornisce una velocità di rotazione del motore ottimale [giri / min] da raggiungere in funzione della potenza richiesta [W];
- File per la massima potenza del motore: questo file (formato 1D) fornisce la massima potenza del motore [W] in funzione della velocità di rotazione del motore [giri / min].

Per descrivere la strategia di driveability si utilizzano sette parametri:

- alimentazione richiesta per avviare la modalità ibrida: se viene richiesta questa potenza o superiore, viene avviato il motore.
- alimentazione richiesta per arrestare la modalità ibrida: se viene richiesta questa potenza o inferiore, il motore viene arrestato.
- regime minimo del motore: usato per sapere se il motore può essere utilizzato o meno.
- richiesta della velocità del veicolo per avviare il motore: se la velocità del veicolo è superiore a questo valore, il motore viene avviato.
- guadagno per la regolazione della velocità di rotazione del motore (%): guadagno per la coppia ottimale del motore seguente.
- coppia del motore elettrico per l'estrazione: durante il pull-away (quando la velocità del motore è bassa <5 giri / min) se il tipo di comando è impostato sulla potenza alla ruota, la coppia richiesta viene impostata da questo parametro.
- soglia del numero di giri del motore elettrico per rigenerare la batteria: se la velocità di rotazione del motore è inferiore a questo valore, vengono utilizzati solo i freni del veicolo.
- file per l'energia di ricarica richiesta per la batteria: questo file (formato 1D) fornisce energia per rigenerare la batteria [W] in funzione dello stato di carica [%].

È di rilevante importanza descrivere la logica utilizzata ed esporre la strategia che è stata implementata per poter stabilire i comandi ai vari organi del veicolo.

Per quanto riguarda la frenata possiamo garantire che il driver ci fornisce un segnale di coppia che chiameremo T_{brake} .

Per quanto riguarda l'accelerazione, invece, in ingresso dal driver vi è un segnale adimensionale $signal_{drive\ adim}$ da moltiplicare con il segnale di coppia del motore termico $T_{ICE\ max}$ in ingresso alla porta 6. Allora la somma di coppia è così definita:

$$T_{sum} = signal_{drive\ adim} T_{ICE\ max} - T_{brake}$$

Inoltre se la coppia richiesta dal guidatore è positiva, per la trazione in avanti la coppia che deve essere comandata al motore elettrico sarà data da:

$$T_{MOT} = \min\left(\frac{T_{sum}}{\tau_{MOT}}; T_{MOT_{MAX}}\right)$$

- τ_{MOT} rapporto di trasmissione tra motore elettrico e ruote;
- $T_{MOT_{MAX}}$ coppia massima del motore elettrico, dettata dalla sua caratteristica di coppia.

Se la coppia richiesta dal guidatore è negativa o nulla e la velocità di rotazione assoluta del motore elettrico è superiore alla soglia della velocità di rotazione del motore elettrico per rigenerare il valore della batteria:

$$T_{MOT} = \max\left(\frac{T_{sum}}{\tau_{MOT}}; T_{MOT_{MIN}}\right)$$

- $T_{MOT_{MIN}}$ coppia minima del motore elettrico, dettata dalla sua caratteristica di coppia.

Se la coppia richiesta dal guidatore è negativa o nulla e la velocità di rotazione assoluta del motore elettrico è inferiore o uguale alla soglia della velocità di rotazione del motore elettrico per rigenerare il valore della batteria:

$$T_{MOT} = 0$$

Inoltre la coppia richiesta all'impianto frenante $T_{command\ brake}$ sarà data da:

$$T_{command\ brake} = \frac{T_{MOT} \tau_{MOT} - T_{sum}}{T_{brake_{MAX}}}$$

- $T_{brake_{MAX}}$ massima coppia frenante, parametro impostato.

Per quanto riguarda il comando di coppia per il generatore e il motore termico dovremmo prima definire tre stati di funzionamento del motore:

- *modalità 0*: il motore è fermo, il generatore non genera nulla (comando di coppia = 0);
- *modalità 10*: il motore si avvia, il generatore utilizza la batteria per avviare il motore (comando di coppia = coppia massima del generatore alla porta 14);
- *modalità 1*: il motore viene avviato, il generatore viene utilizzato per caricare la batteria e guidare il veicolo.

Di rilevante importanza è il terzo caso, se il motore viene avviato (modalità 1), i comandi di accensione del motore e della coppia del generatore vengono calcolati come segue, possiamo prima definire una costante temporale:

$$temp = \frac{\min(P_{total}; P_{MAX})}{P_{MAX}} + \frac{(\omega_{ICE_{OPT}} - \omega_{ICE_{SENS}}) gain_{\omega}}{100}$$

- P_{total} è la potenza totale richiesta : $P_{total} = P_{batt} + T_{ice} \omega_{ice}$;
- P_{MAX} è la potenza massima del motore termico;

- $w_{ICE_{OPT}}$ è la velocità angolare ottima del motore termico, informazione ricavata dalle mappe inserite nella centralina;
- $w_{ICE_{SENS}}$ è la velocità angolare del motore termico rilevata attraverso un sensore di velocità;
- $gain_w$ è il guadagno per la regolazione della velocità per cercare di diminuire il gap di errore, differenza tra le due velocità.

Se la variabile temporale $temp$ è positiva allora il comando di coppia del generatore sarà:

$$T_{GEN} = - \max \left(\left(\frac{\min(P_{total}; P_{MAX})}{P_{MAX}} - 0.1 \right); 0.0 \right) T_{GEN_{MAX}}$$

- $T_{GEN_{MAX}}$ coppia massima generatore, informazione estrapolata dalla caratteristica di coppia.

In questo caso il motore termico risulta avviato e il suo funzionamento è a pieno carico.

Se la variabile temporale è negativa allora il comando di coppia del generatore sarà:

$$T_{GEN} = - \frac{\min(P_{total}; P_{MAX})}{P_{MAX}} T_{GEN_{MAX}}$$

E il motore termico non risulterà a pieno carico ma il suo carico sarà determinato da:

$$trottole_{ICE} = \frac{\min(P_{total}; P_{MAX})}{P_{MAX}} + \frac{(\omega_{ICE_{OPT}} - \omega_{ICE_{SENS}}) gain_w}{100} = temp$$

La strategia implementata al suo interno segue una logica di ottimizzazione differente a quella utilizzata mediante il precedente tool HOT. La centralina ha come obiettivo di stabilire i comandi e le coppie da fornire ai principali organi del veicolo cercando di mantenere lo stato della batteria ad un livello accettabile qualora il veicolo dovesse essere fermato prima della fine del suo ciclo guida standard. Per fare ciò si serve allora di una strategia di ricarica della batteria basata essenzialmente sulla frenata rigenerativa, lì dove è possibile, e sull'utilizzo del motore termico che è portato a lavorare nei suoi punti di ottimo.

I punti di ottimo sono stati ricavati e inseriti mediante una mappa all'interno del sotto modello in modo che possano essere resi disponibili alla compilazione dell'algoritmo, che sfrutta le equazioni illustrate.

Dopo aver opportunamente impostato e tarato i sotto modelli sono stati settati i parametri della simulazione. La simulazione temporale ci permette di ottenere una serie di dati desiderati che sono stati utilizzati per effettuare delle analisi di sensitività.

3.3.2 Risultati simulazione

Per prima cosa, abbiamo confermato e valutato che il veicolo sia in grado di percorrere il ciclo guida impostato come prova del fatto che esso nel suo insieme risulta essere reattivo alle richieste di coppia e frenata del driver e che possa essere effettivamente utilizzato su strada. La Fig. 3.28 riporta il confronto tra la velocità del ciclo guida e la velocità reale del veicolo. Possiamo dire che sostanzialmente i due profili corrispondono e che il modello rispecchia le richieste di inseguimento di velocità.

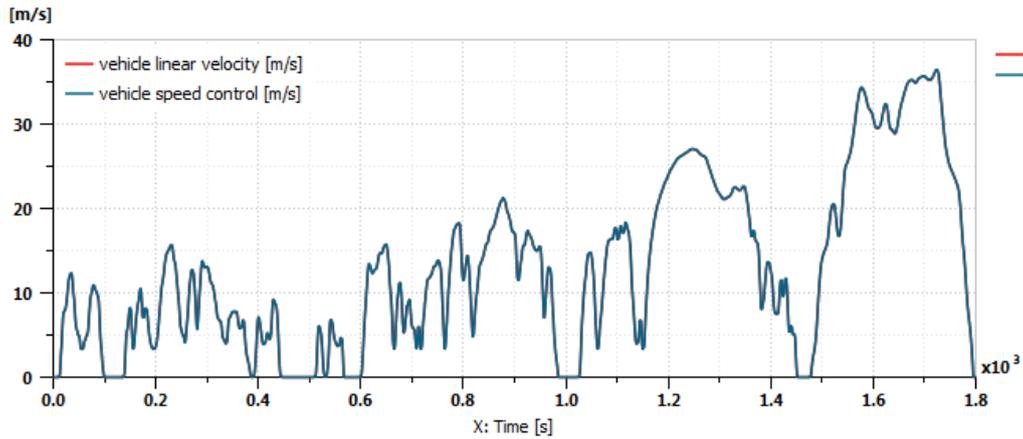


Fig. 3.28: Analisi inseguimento della velocità di riferimento.

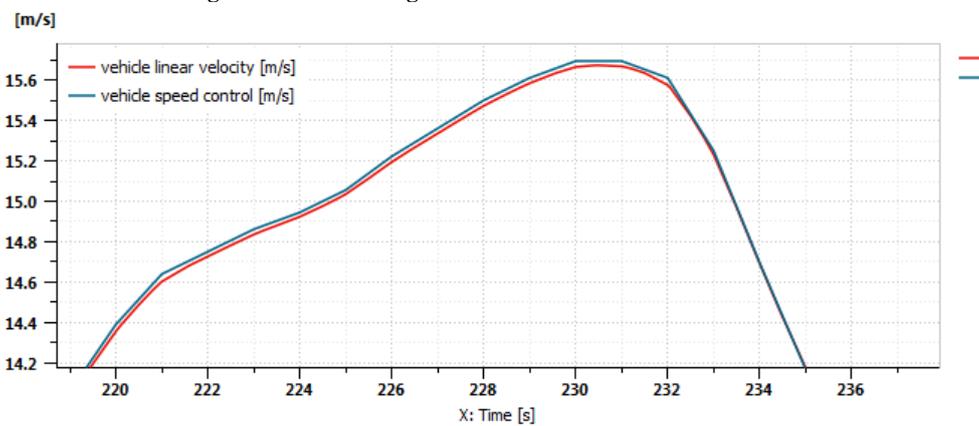


Fig. 3.29: Zoom andamento della velocità riportato in figura precedente.

Successivamente possiamo eseguire un'analisi sul Jerk/ accelerazione, in modo da confrontare la risposta del veicolo al cambiamento della velocità, nei tratti di accelerazione e frenata. Anche in questo caso i due profili seguono lo stesso andamento,

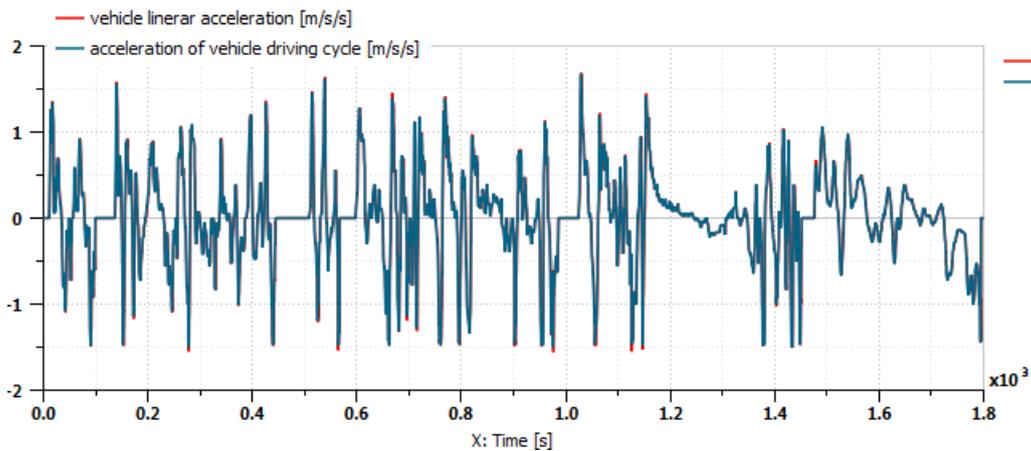


Fig. 3.30: Analisi di inseguimento dell' accelerazione di riferimento.

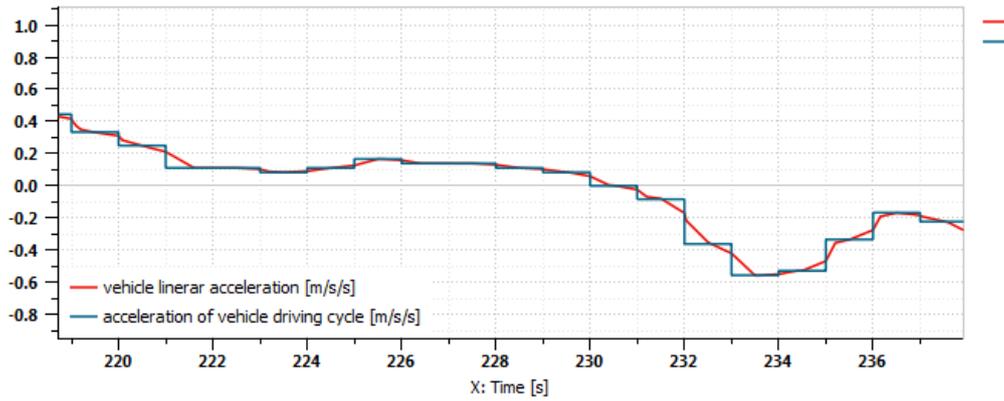


Fig. 3.31: Zoom andamento dell'accelerazione in figura precedente.

In seguito è stato analizzato lo stato di carica della batteria SOC e come possiamo notare dalla Fig. 3.32, lo stato di carica viene mantenuto all'interno di una banda compresa tra il +5[%] e -5[%] del valore iniziale. Inoltre non si raggiungono mai valori di SOC molto alti o molto bassi per cui la batteria non subisce particolari sovraccarichi e sottocarichi che potrebbero ridurre la sua vita utile. Inoltre questo permette di avere alla fine della simulazione un valore di SOC pari al 63 [%] accettabile e veicolo pronto per poter effettuare un nuovo percorso di guida.

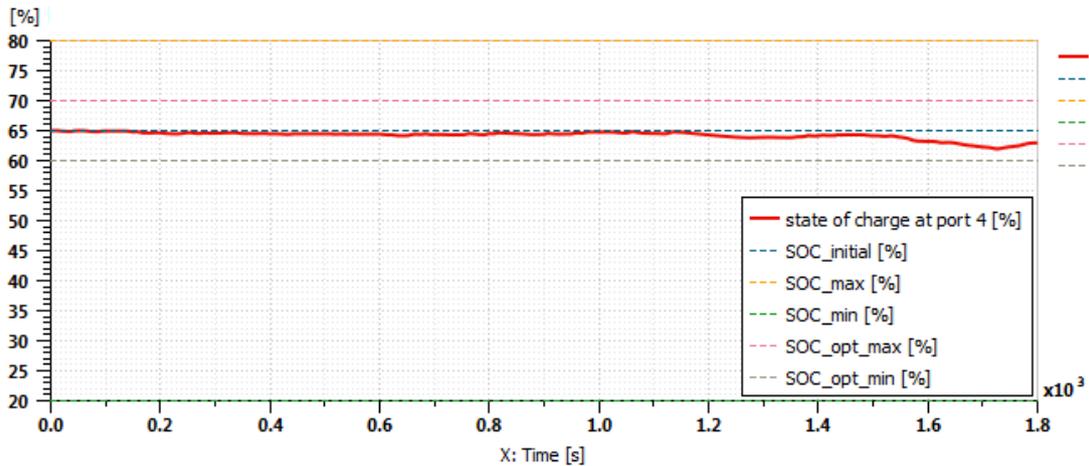


Fig. 3.32: Andamento dello stato di carica della batteria.

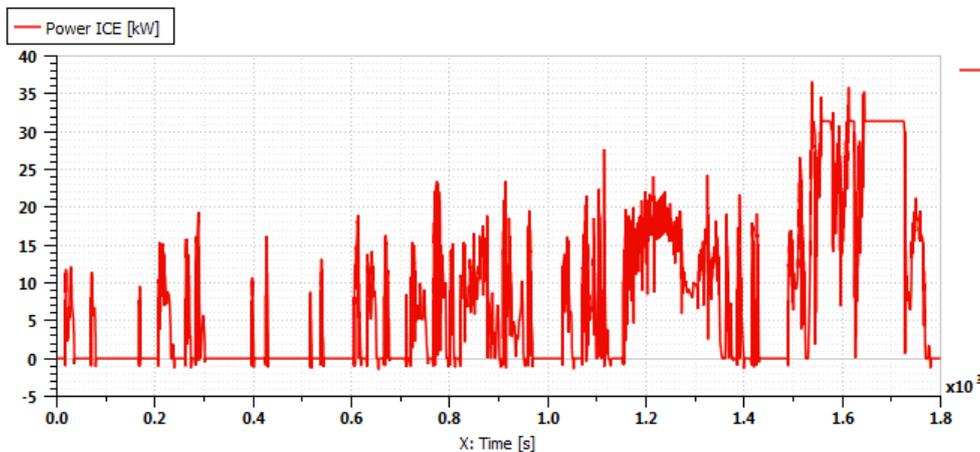


Fig. 3.33: Andamento della potenza ICE.

In Fig.3.33, Fig. 3.34 e Fig. 3.35 sono riportati rispettivamente gli andamenti della potenza del motore termico, motore elettrico e generatore con la rispettiva convenzione. La potenza negativa corrisponde alla potenza destinata alla rigenerazione della batteria. Il generatore presenta quasi solo potenza negativa dato che serve appunto per trasformare la potenza meccanica del motore termico in potenza elettrica da fornire alla batteria o direttamente per alimentare il motore elettrico. Il motore elettrico presenta potenza negativa dovuta, essendo una configurazione serie, alla rigenerazione mediante la sola frenata.

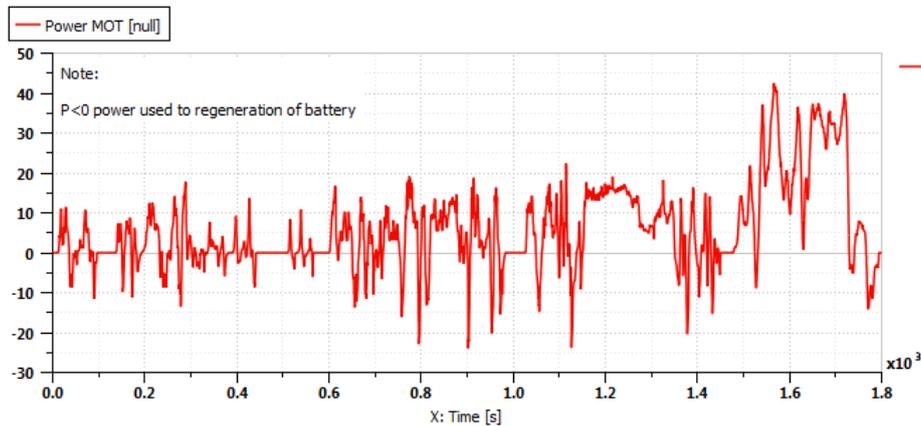


Fig. 3.34: Andamento della potenza MOT.

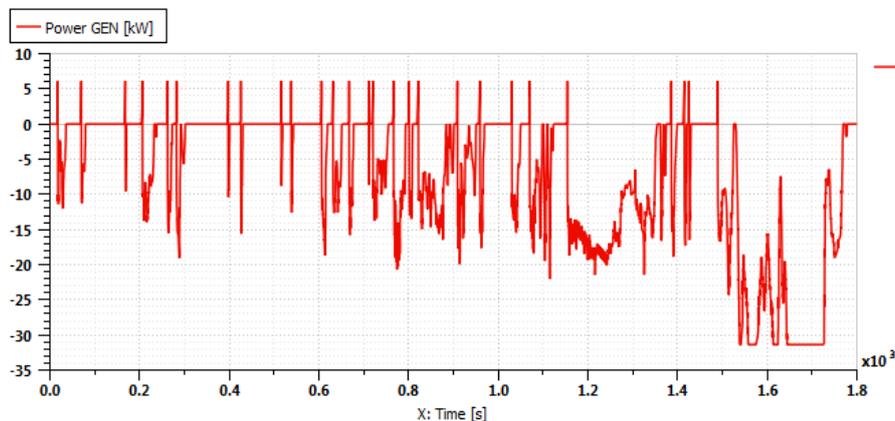


Fig. 3.35: Andamento della potenza GEN.

La Fig. 3.36 mostra i punti di funzionamento del motore termico. Si nota che i punti si dispongono sulla curva Economic line dell'ICE, a prova del fatto che si sta ottimizzando il suo funzionamento e si sta ottenendo un risparmio di combustibile.

La Fig. 3.37 mostra invece i punti di funzionamento del generatore nella convenzione macchina elettrica. Questo ci mostra come l'accoppiamento motore termico/generatore avviene in maniera ottimale in una zona caratterizzata da un rendimento compreso tra 0.96 e non inferiore al 0.92 .

Nella Fig. 3.38 sono riportati i punti di funzionamento del motore elettrico. In questo grafico si nota come il motore elettrico è impegnato sia nella propulsione fornendo coppia positiva, ma anche nella fase di frenata. I punti di funzionamento al di sotto dello zero, sono i punti che si raggiungono in fase di frenata quando il motore funziona come generatore e dunque il veicolo andrà in modalità frenata rigenerativa.

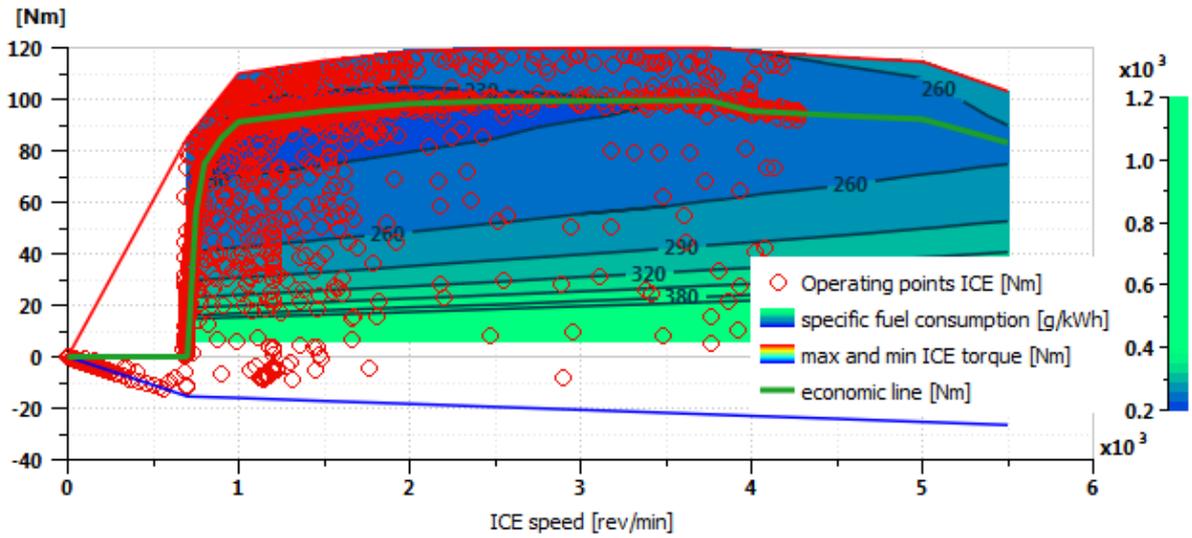


Fig. 3.36: Punti di funzionamento ICE.

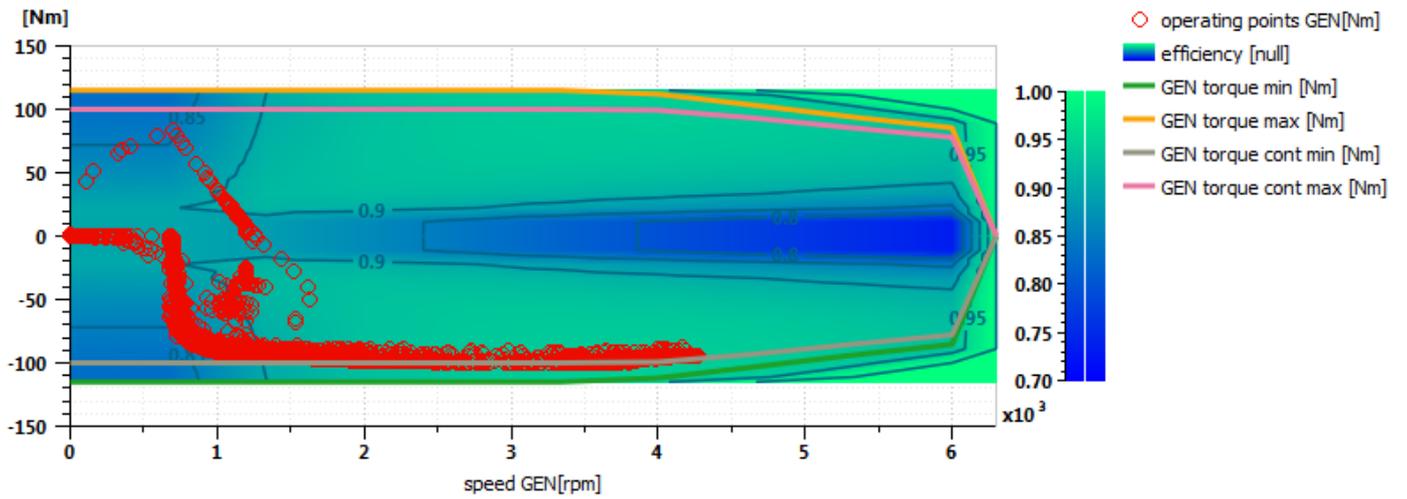


Fig. 3.37: Punti di funzionamento GEN.

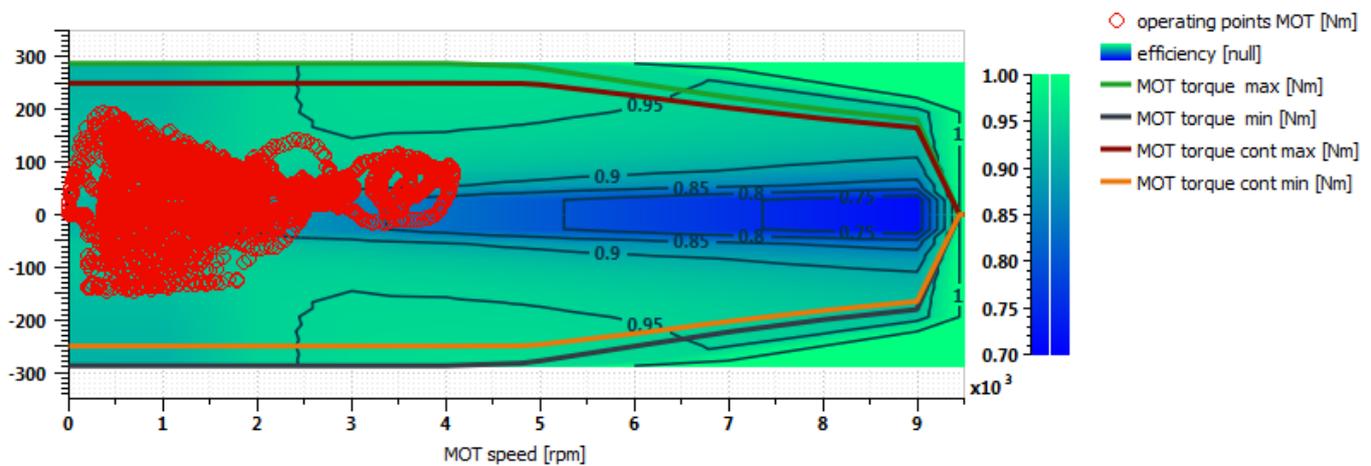


Fig. 3.38: Punti di funzionamento MOT.

A fronte di questo si è effettuato un'analisi sulla frenata, rilevando dunque la quantità di coppia negativa impegnata dal motore elettrico e quella richiesta all'impianto frenante.

Sono riportati gli andamenti della richiesta di coppia frenante dettata dal driver e quella che viene stabilita dal motore elettrico e impianto frenante.

È utile analizzare quando è possibile effettuare la frenata con il motore elettrico, questo dipende da due fattori principali. Il primo è la disponibilità di coppia per quel numero di giri, il motore elettrico sarà in grado di fornire coppia negativa fino a saturazione oppure se la coppia richiesta è rilevante da far attuare la modalità frenata rigenerativa.

Il secondo motivo è la dipendenza dallo stato di carica della batteria, se la frenata avviene in una fase di richiesta di potenza elettrica, per la ricarica della batteria si attiverà la modalità di ricarica, se invece la batteria è carica abbastanza la centralina evita la sua ricarica.

In seguito sono riportati le analisi sulla coppia frenante e potenza richiesta per la frenata. Attraverso i sensori di velocità e coppia abbiamo calcolato la richiesta di coppia frenante del driver e le quote separate dei coppia per il motore elettrico e impianto frenante.

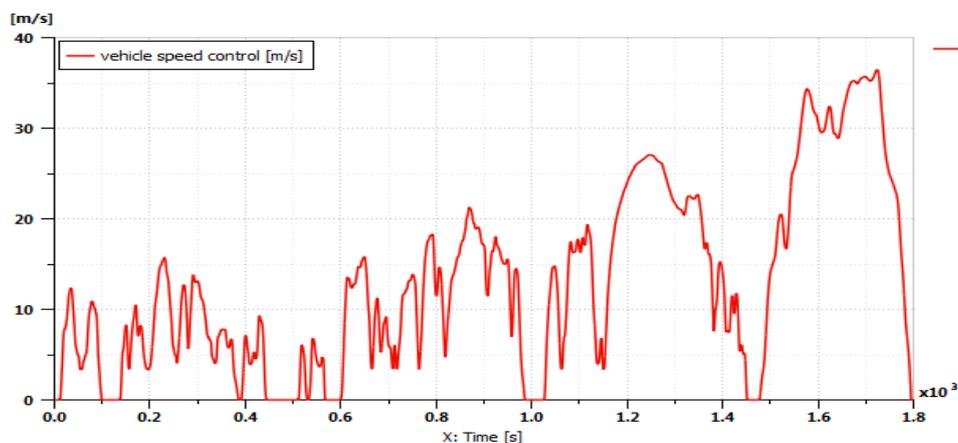


Fig. 3.39: Andamento della velocità di controllo del veicolo

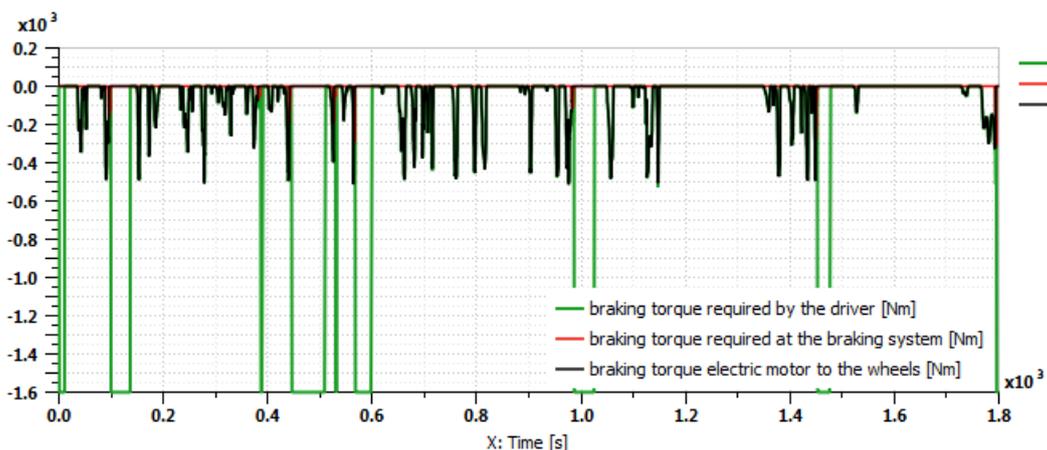


Fig. 3.40: Analisi sulla frenata rigenerativa.

Per quanto riguarda la coppia frenante sono riportati nella Fig.3.40 l'andamento delle curve di coppia richiesta dal driver, coppia motore elettrico e coppia impianto frenante nell'intera simulazione e l'andamento della velocità del veicolo nella Fig.3.39 .

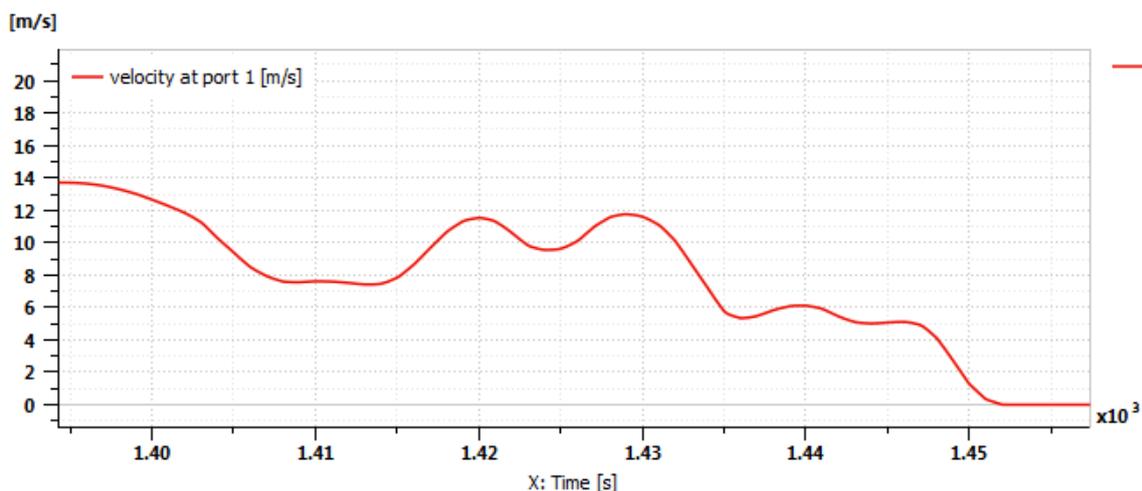


Fig. 3.41: Zoom andamento della velocità.

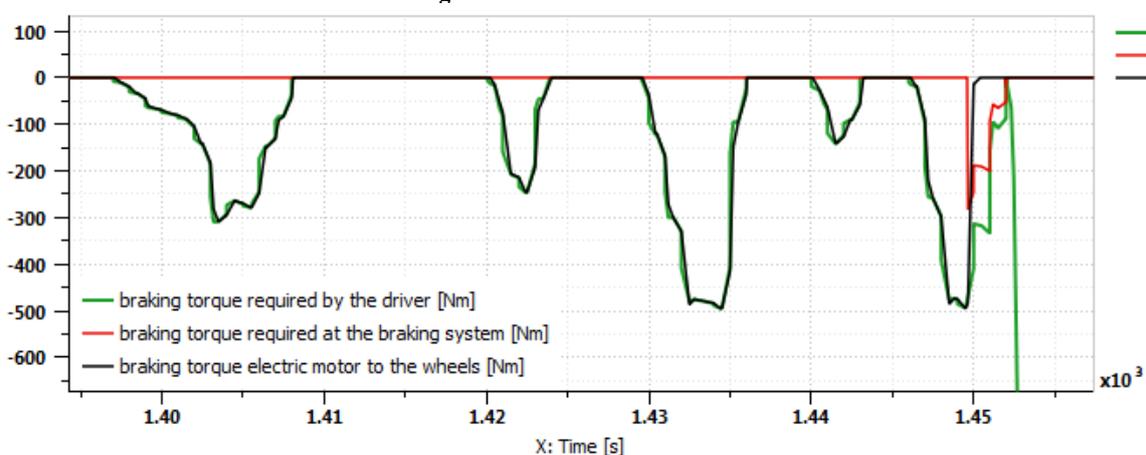


Fig. 3.42: Zoom andamento delle coppie richieste per la frenata del veicolo.

Consideriamo un triangolo di velocità, ad esempio l'intervallo a cavallo degli istanti 1355 e 1455 secondi, e analizziamo la fase di frenata. Si nota che in corrispondenza dei transitori di accelerazione la coppia di frenata sarà nulla.

Nei transitori di discesa del ciclo guida il driver richiederà coppia frenante, a questo punto si nota una sovrapposizione della curva nera e verde, rispettivamente coppia richiesta dal driver e coppia frenante motore elettrico, a prova del fatto che il motore elettrico da solo è in grado di esaurire la richiesta di frenata e quindi possibile attuazione della modalità di frenata rigenerativa.

Quando la richiesta di coppia di frenata è maggiore, in corrispondenza ad un cambio di pendenza del triangolo di velocità il motore elettrico sarà affiancato dall'attivazione dell'impianto frenante come si nota dal secondo 1450.

In questo caso si evince che il motore elettrico non fornisce coppia negativa, la coppia va a 0 e interviene solo l'impianto frenante, questo accade perché in prossimità del secondo 1450 la velocità del motore termico è al di sotto della soglia minima per poter attivare la frenata rigenerativa.

In seguito sono riportate le curve di potenza richiesta per la frenata. Dalla Fig.3.43 si può notare come della totalità della potenza chiesta dal driver per frenare solo una piccola parte viene spesa dall'impianto frenante, e che la richiesta viene compensata dal motore elettrico, che a meno del rendimento di conversione consentirà l'energia meccanica di essere trasformata in energia elettrica e immagazzinata nella batteria.

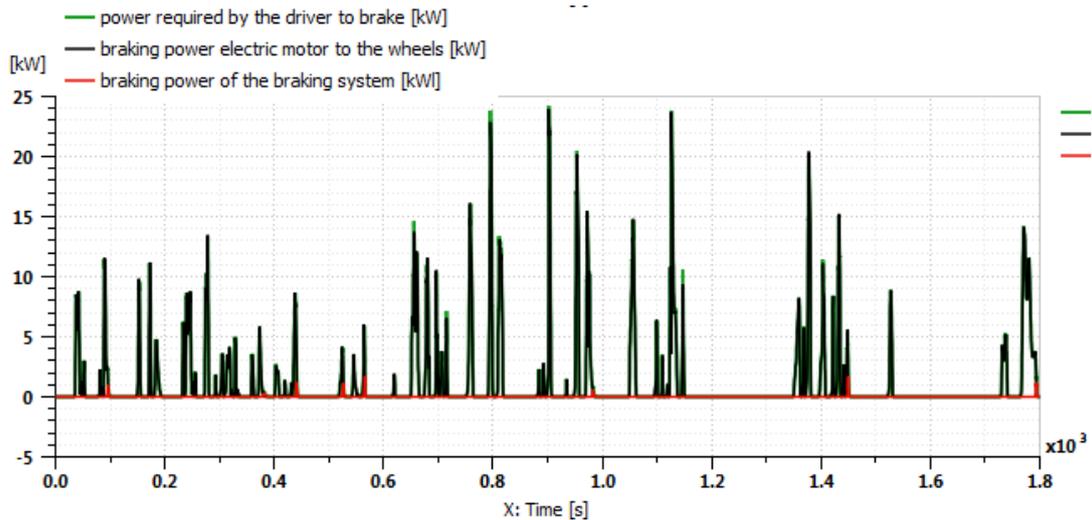


Fig. 3.43: Andamento della potenza richiesta per frenare per i diversi dispositivi.

Possiamo ora analizzare attraverso la Fig.3.44 la corrente e la tensione della batteria e il suo andamento rispetto ad ciclo guida per valutare allora la potenza elettrica che viene rigenerata. La tensione dopo il transitorio iniziale si mantiene stabile e poco variabile sul valore di 130 V mentre la corrente subisce delle variazioni più considerevoli.

I valori di corrente positiva corrispondono alla quantità di corrente utilizzata per alimentare il motore elettrico di trazione e in alcuni casi per l'avviamento del motore termico.

La quota, invece, negativa rappresenta la quantità di corrente in entrata e in corrispondenza vi sarà una quota di potenza elettrica negativa.

Se analizzato con il profilo di velocità del veicolo in corrispondenza delle richieste di accelerazione la corrente avrà dei picchi negativi, il veicolo necessita di coppia.

In corrispondenza di una forte frenata come tra i secondi 1400 e 1500 s e l'ultimo tratto dal 1700 al 1800 secondi, si nota un forte incremento di corrente e dei picchi negativi, quindi la batteria si sta rigenerando.

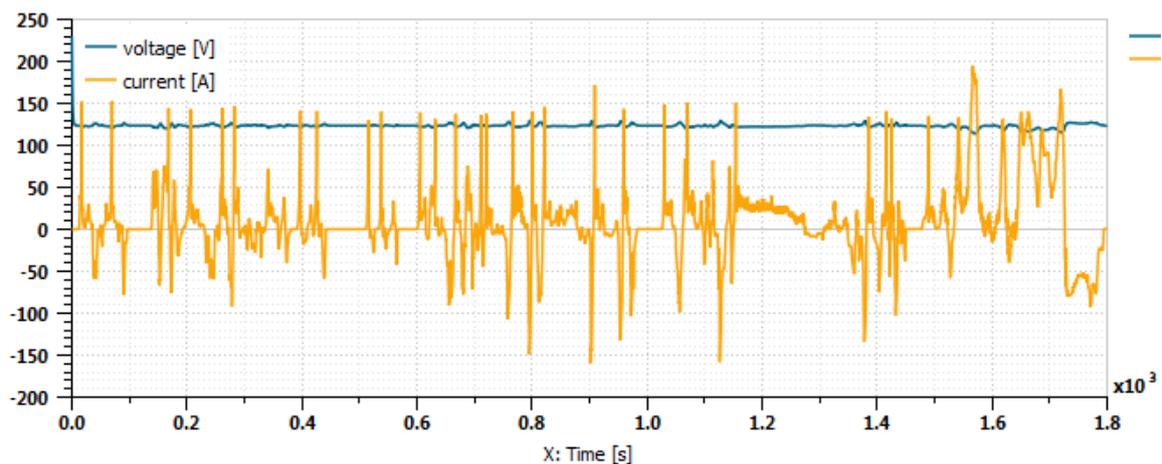


Fig. 3.44: Andamento della corrente e tensione in uscita dalla batteria.

La Fig. 3.45 mostra l'andamento della potenza elettrica della batteria nel tempo. Come per la corrente i valori positivi rappresentano la quota di potenza in uscita dalla batteria e in conseguenza la quantità di potenza ricavata dalla frenata rigenerativa per la ricarica della batteria.

Un parametro importante da analizzare è anche la variazione della capacità della batteria nel tempo in funzione del carico, essa è riportata in Fig.3.46 e mostra come nel tempo viene utilizzata la capacità della batteria in particolare nei transitori di decelerazione in corrispondenza della coppia negativa del motore elettrico la batteria si rigenera e la pendenza diviene dunque negativa e la capacità interna aumenta.

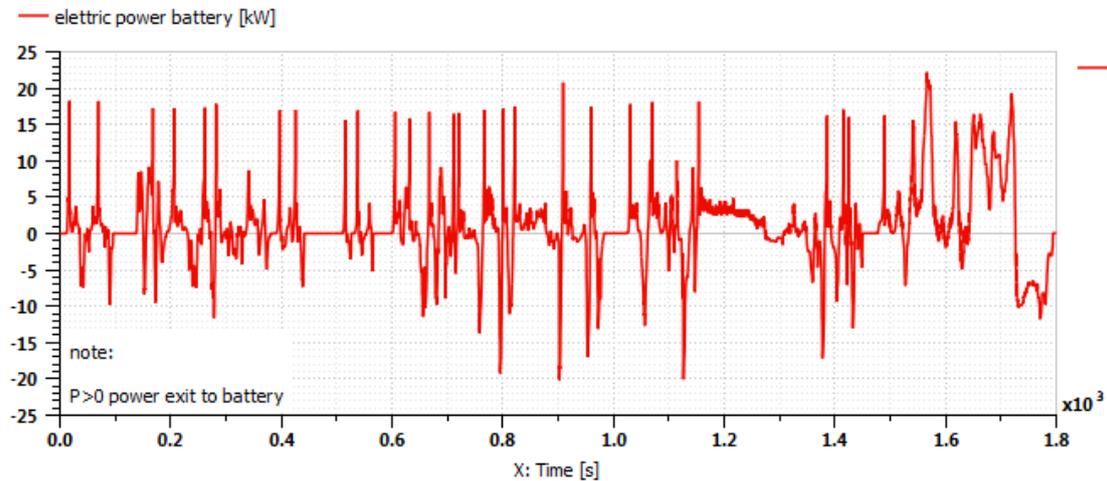


Fig. 3.45: Andamento della potenza della batteria.

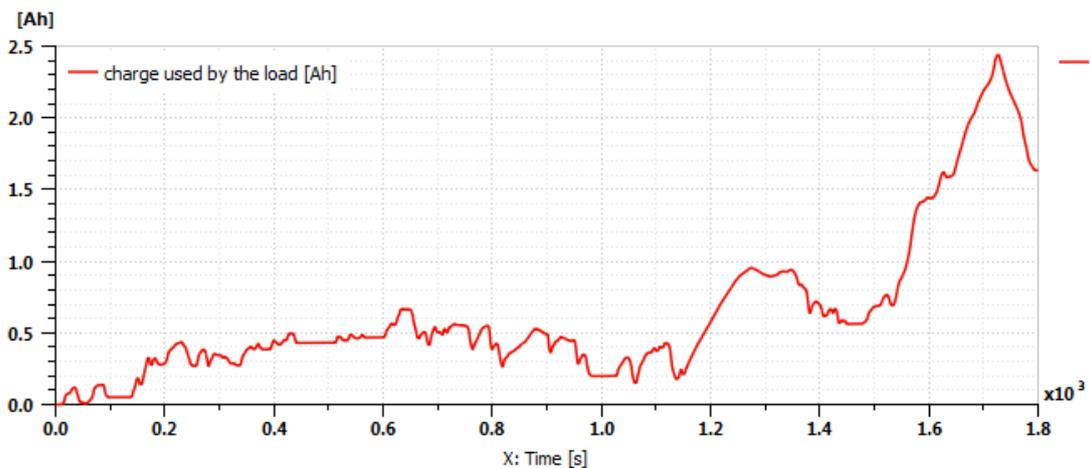


Fig. 3.46: Andamento della quantità di carica usata per la trazione del veicolo.

Successivamente la Fig.3.47 mostra le modalità operative del veicolo ibrido che vengono selezionate durante la trazione dalla batteria.

Il grafico mostra la funzione solamente elettrica in corrispondenza dello 0, la modalità ibrida in corrispondenza del valore 1 e infine l'avviamento del motore termico che corrisponde dell'inizio della modalità ibrida con il valore 2.

Si può evidenziare che nei primi tratti della simulazione in corrispondenza del ciclo di guida urbano il modo operativo elettrico è quello più utilizzato e il motore termico viene avviato poche volte.

A seguito sia per una richiesta di ricarica della batteria, sia per un aumento della richiesta di coppia e potenza del veicolo vi è un più diffuso avviamento del motore termico con corrispettiva modalità ibrida in particolare nel tratto di ciclo ad alta velocità.

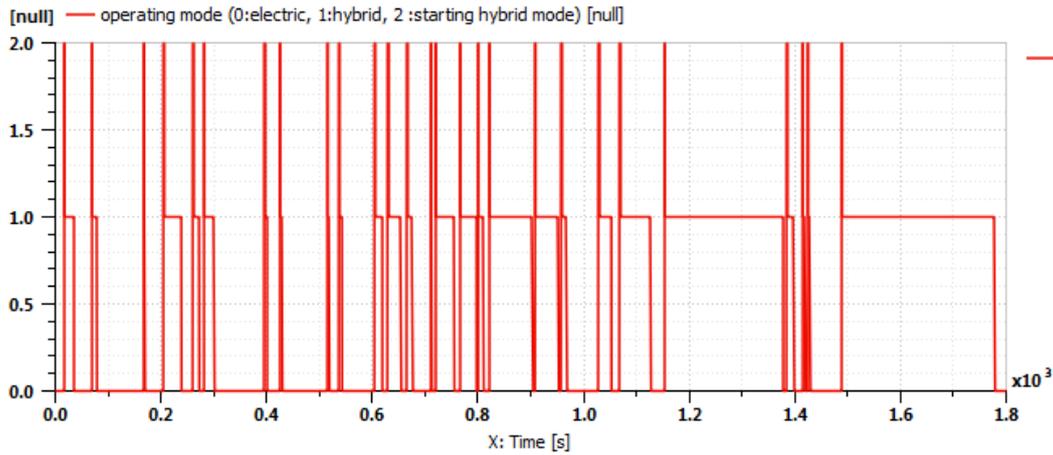


Fig. 3.47: Andamento dei modi di funzionamento del veicolo.

Infine in Tabella 3.5 sono riportati i dati riguardanti il consumo di combustibile cumulato nel tempo e data la diretta proporzionalità con le emissioni di anidride carbonica possiamo anche valutare una stima della sua cumulata.

Consumo di combustibile cumulato	899.2 [g]
Anidride carbonica cumulata	2832.44 [g]

Tabella 3.5: Risultati consumo della simulazione.

Il modello costruito non è predisposto per valutare le emissioni inquinanti di diversa specie, per questo tipo di analisi il software offre la possibilità di una libreria demo con delle mappe di inquinanti che potrebbero essere prese eventualmente in considerazione.

4 CAPITOLO : VEICOLO IBRIDO ELETTRICO PARALLELO P2

In questo capitolo è stato implementato un modello di veicolo ibrido parallelo. Tra le varie architetture in parallelo è stato scelto di creare ed analizzare nello specifico la configurazione P2, in cui la singola macchina elettrica è inserita a monte del cambio di velocità. Tale selezione è stata eseguita in base ai risultati delle analisi effettuate dai ricercatori Yalian Yang, Xiaosong Hua, Huanxin Pei, Zhiyuan Peng riportate nell'articolo scientifico "Comparison of power-split and parallel hybrid powertrain architectures with a single electric machine: Dynamic programming approach", le quali rilevano tra le architetture in parallelo, considerate nell'analisi, un vantaggioso risparmio di combustibile della configurazione P2, utilizzata Hyundai e Infinite M35, rispetto alla configurazione P1, utilizzata ad esempio in Honda Insight e Chevrolet Silverado.

Deciso il tipo di architettura, sono state eseguite le seguenti analisi con il tool HOT:

- Veicolo elettrico range extender;
- Simulazione principale;
- Simulazione con diverse metriche di driveability;

In seguito è stato creato un modello mediante l'assemblaggio dei vari organi e sottomodelli disponibili nelle apposite librerie e sono state eseguite analisi:

- Inseguimento della velocità e accelerazione;
- Livello dello stato di carica della batteria;
- Flusso di potenza ICE, MOT e BAT;
- Frenata rigenerativa e andamento temporale della potenza ripristinata;
- Analisi sul miglioramento del comfort durante il cambio di marcia.

4.1 Ottimizzazione attraverso Hybrid optimization tool

Utilizzando il tool HOT abbiamo eseguito e creato un modello che presenta la architettura riportata in Fig.4.1, la posizione del motore elettrico è tra il motore termico e il cambio marcia per cui si ha una configurazione ibrida parallela P2.

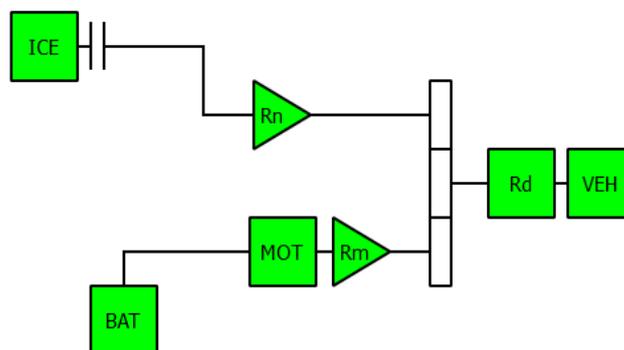


Fig. 4.1: Architettura veicolo ibrido parallelo.

Il veicolo ibrido parallelo ha la caratteristica di avere motore termico e motore elettrico vincolato alle ruote, la potenza e la coppia fornita per la propulsione è il risultato di un ottimo contributo di entrambi. Il dimensionamento del veicolo si basa sulla volontà di ottenere una velocità massima del veicolo di 200 [km/h] con potenza massima alle ruote di 163 [Cv], circa

il doppio della configurazione serie. Il motore termico, a differenza dell'architettura serie, non può essere ridotto di taglia in maniera eccessiva per cui presenta le seguenti caratteristiche:

Coppia massima:	155.5 [Nm] a 3750 [rpm]
Potenza massima:	119.0 [Cv] a 6000 [rpm]
Cilindrata:	1.6 [l]
Numero di cilindri:	4
Numero di valvole per cilindro:	4
Densità del combustibile:	750 [kg/m ³]
Potere calorifico inferiore combustibile:	42000 [kJ/kg]
Tipo ciclo motore:	Ciclo Atkinson
Velocità idle:	700 [rpm]

La caratteristica di coppia e di consumo è descritta mediante la Fig.4.2 . In questo caso dato i vincoli meccanici, il motore termico non può essere dimensionato per lavorare nella zona a minimo consumo. Attraverso la Energy Management Strategy implementata all'interno dell'algoritmo del tool HOT e poi nella centralina ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy) del veicolo su strada, si garantisce performance del consumo istantaneo di combustibile su tutto l'orizzonte temporale della simulazione.

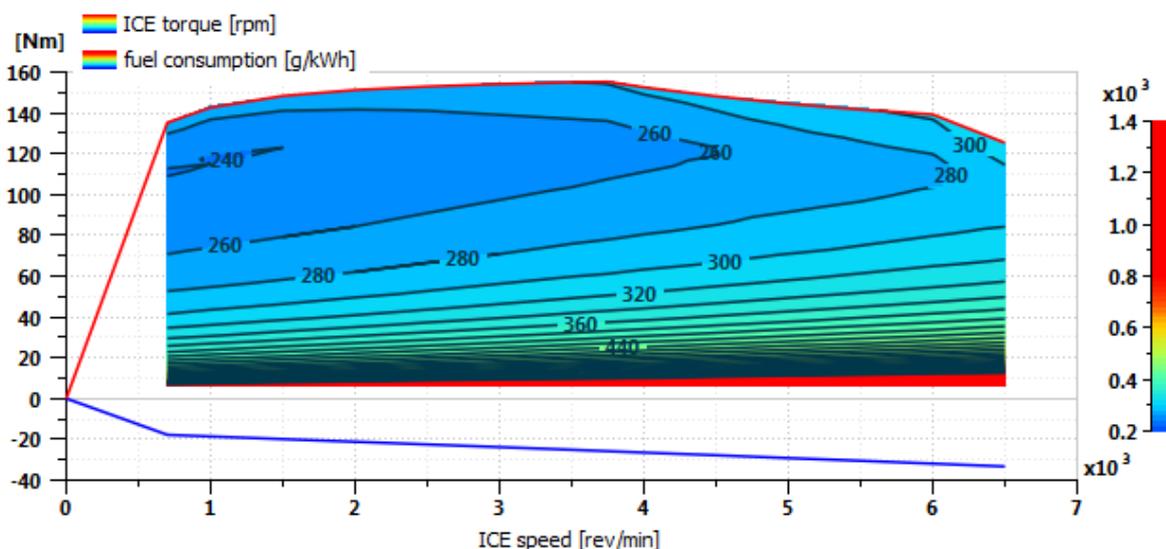


Fig. 4.2: Caratteristica di coppia e consumo specifico ICE

Il motore elettrico indicato con la sigla MOT è un motore elettrico ad induzione e presenta le seguenti quantità di coppia e potenza massima:

Coppia massima continuativa:	250 [Nm]
Coppia massima	287 [Nm]
Potenza massima continuativa:	90 [Cv] a 2500 [rpm]

La caratteristica di coppia del motore elettrico e le perdite totali, complessive di perdite nel rame e nel ferro considerate all'interno della sua efficienza sono riportati nella Fig.4.3.

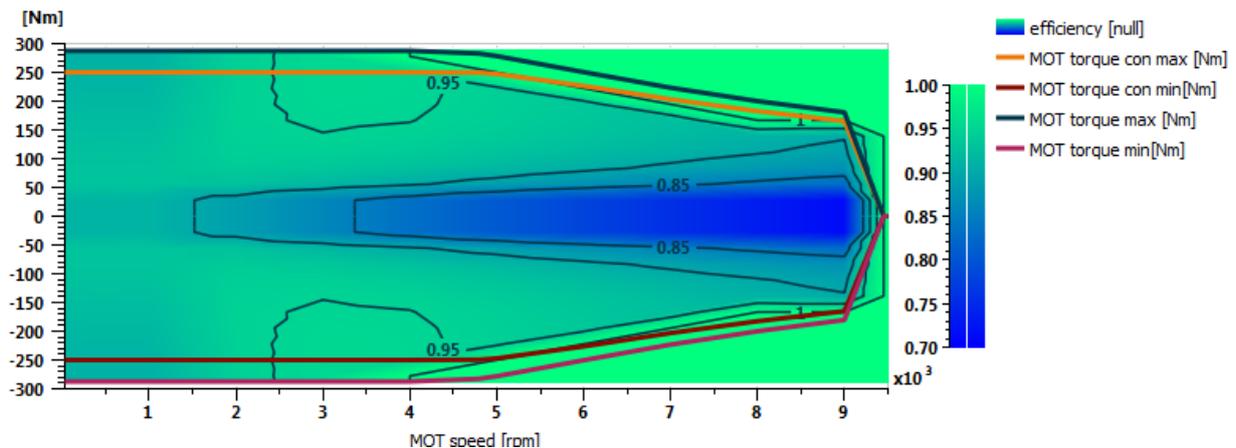


Fig. 4.3: Caratteristica di coppia e rendimento MOT.

La configurazione in atto, non presenta un generatore come l'architettura serie in quanto si ha un doppio flusso energetico e l'energia meccanica prodotta dal motore termico non deve essere convertita in energia elettrica, evitando quindi la conversione energetica e allora le perdite di energia saranno ridotte. L'utilizzo di un solo motore elettrico rende questo tipo di veicolo oltre ad essere più economico, ma anche distante dalla architettura di un veicolo elettrico puro. Infatti il grado di ibridazione del veicolo è ottenuto:

$$\text{fattore di ibridizzazione} = \frac{\text{Potenza Elettrica}}{\text{Potenza totale bordo veicolo}} = 42.8 \%$$

La percentuale è più bassa rispetto al veicolo precedente, ha una architettura molto più vicina ad un veicolo tradizionale ma presenta differenti vantaggi in termini di risparmio carburante ed emissione.

La batteria utilizzata è una batteria a ioni di litio e presenta le seguenti caratteristiche:

n° di elementi in serie in un branch:	100
n° di branchs in parallelo:	1
Capacità della batteria:	26 [Ah]
Range accettabile di SOC (state of charge):	80-20 [%]
SOC iniziale:	65 [%]
Tensione batteria:	150 [V]

In Fig.4.4 è riportato la dipendenza del DOC con il voltaggio e la curva in Fig.4.5 rappresenta le perdite interne in funzione del DOC.

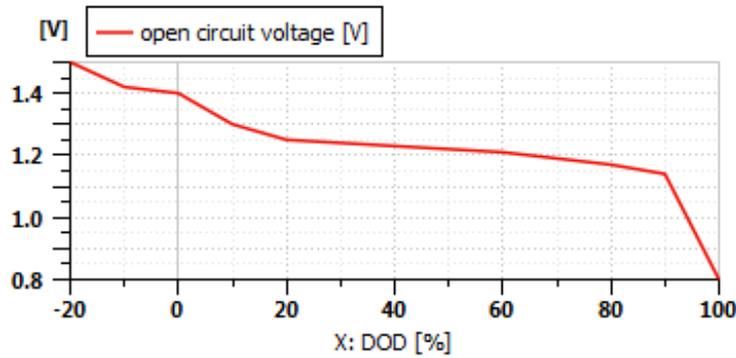


Fig. 4.4: Andamento della tensione in funzione del DOD.

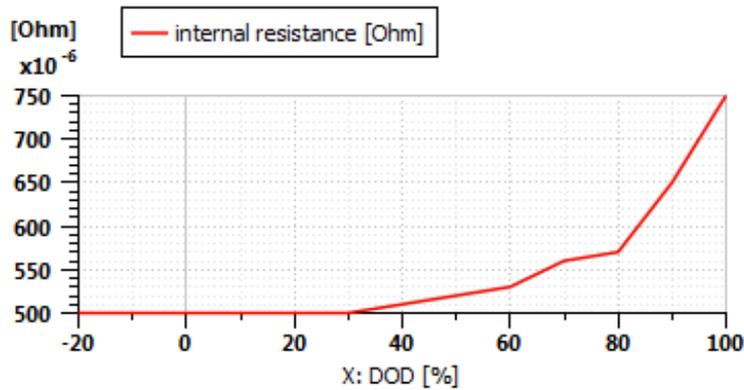


Fig. 4.5: Andamento della resistenza in funzione del DOD.

Per quanto riguarda la trasmissione, si è scelto di inserire un riduttore di velocità a ridosso del motore elettrico avente un rapporto di trasmissione $\tau_M = 1.2$ mentre a ridosso del motore termico il rapporto di trasmissione sarà unitario. Inoltre la scelta tecnica utilizzata è quella di inserire un cambio di velocità a 5 rapporti a ridosso del differenziale dopo il nodo che unisce meccanicamente i due motori.

	n	eta
Rapporto prima marcia τ_1 :	3.5	0.95
Rapporto seconda marcia τ_2 :	2	0.96
Rapporto terza marcia τ_3 :	1.4	0.97
Rapporto quarta marcia τ_4 :	1	0.98
Rapporto quinta marcia τ_5 :	0.85	0.98
Rapporto finale al ponte τ_p :	4.25	0.98

La quarta marcia è stata dimensionata per la velocità massima del veicolo 200 [km/h] ad una potenza di 163 [Cv], e la prima marcia è stata dimensionata per la massima accelerazione pari a 5.78 [m/s²] e un effettuare la manovra 0-100 [km/h] in 4.8 [s] in puro elettrico.

Successivamente possiamo definire tutte le caratteristiche del veicolo che poi andranno a definire le forze di resistenza al moto:

Sezione frontale veicolo:	2 [m ²]
Coefficiente aereodinamica Cx:	0.3 [-]
Coefficiente di attrito f:	0.01 [-]
Larghezza pneumatico:	170 [mm]
Altezza pneumatico:	65 [%]
Diametro cerchio:	15 [in]
Inerzia ruota:	0.75 [kg m ²]
Massa totale veicolo:	1400 [kg]

Nella sezione destinata alla selezione della logica di driveability è possibile settare e definire le perdite e le penalità dovute alla accensione e spegnimento del motore termico e in questo caso anche per il cambio marcia. Nella tabella in basso sono definiti i parametri:

Penalità per accensione motore termico:	1000 [W]
Penalità per spegnimento motore termico:	500[W]
Penalità dovuta alla trasmissione e cambio marcia:	500[W]
Tempo durante il quale la penalità dell'accensione motore rimane attiva:	4 [s]
Tempo durante il quale la penalità dello spegnimento motore rimane attiva:	2[s]

Data la presenza del cambio di velocità possiamo definire anche la logica di passaggio da una marcia selezionata alle altre. In base al rapporto di marcia selezionato otterremo un rapporto finale che andrà a stabilire un modo di funzionamento. Nel nostro caso abbiamo fissato per il modo 0 l'utilizzo del veicolo in puro elettrico. La tabella mostra come è possibile passare da un modo all'altro. La logica implementata è quella classica per cui selezionata una qualunque marcia è possibile saltare a quelle vicine oppure al modo 0 puro elettrico.

	0	1	2	3	4	5
From mode 0 to	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
From mode 1 to	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
From mode 2 to	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
From mode 3 to	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
From mode 4 to	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
From mode 5 to	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

	Rd	Rm	Rn
Ratios for mode 0	8.5	1.2	0.0
Ratios for mode 1	14.875	1.2	1.0
Ratios for mode 2	8.5	1.2	1.0
Ratios for mode 3	5.95	1.2	1.0
Ratios for mode 4	4.25	1.2	1.0
Ratios for mode 5	3.6125	1.2	1.0

Fig. 4.6: Modalità di selezione del cambio di marcia.

Definito i parametri di guidabilità del veicolo si passa alla definizione del ciclo di guida, come nel caso precedente si è selezionato un ciclo di guida WLTC per un veicolo di taglia media e delle perdite di potenza elettrica per l'utilizzo degli accessori. Il cambio di marcia è lasciato

come una variabile da ottimizzare dall' algoritmo in modo da avere il profilo di cambio marcia ottimo per il risparmio di combustibile.

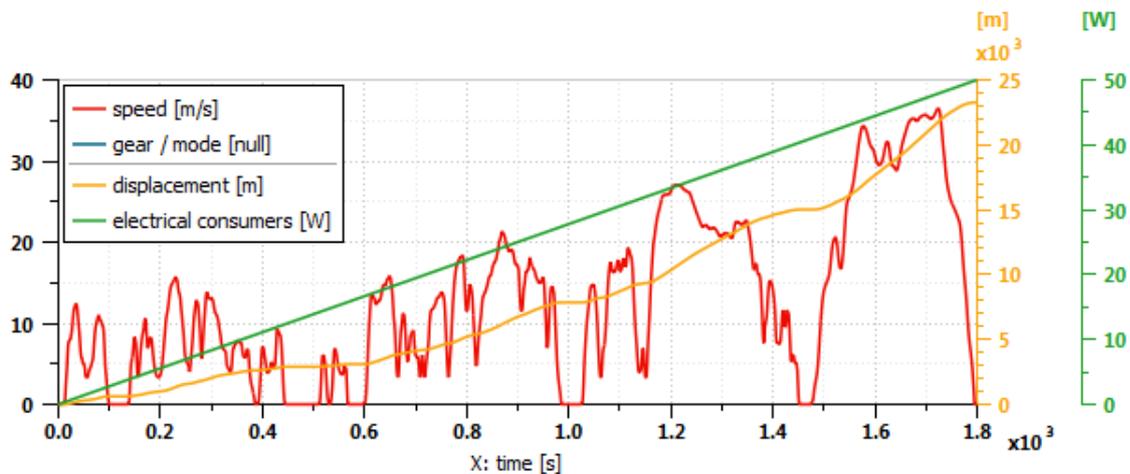


Fig. 4.7: Definizione del Ciclo guida, potenza destinata agli accessori e spazio percorso.

Successivamente si riportano i parametri principali utili ai fini della impostazione della simulazione:

Computation sampling time:	0.5 [s]
Tolleranza sul SOC finale:	5 [%]
Massimo numero di iterazioni	50
Massimo valore di s (fattore di equivalenza):	2
Minimo valore di s (fattore di equivalenza):	4

Seguendo le indicazioni già descritte nel paragrafo riguardante la configurazione ibrida serie, si avvia la simulazione e si raggiunge la convergenza dell' algoritmo. Sono allora riportati i risultati ottenuti dalla simulazione:

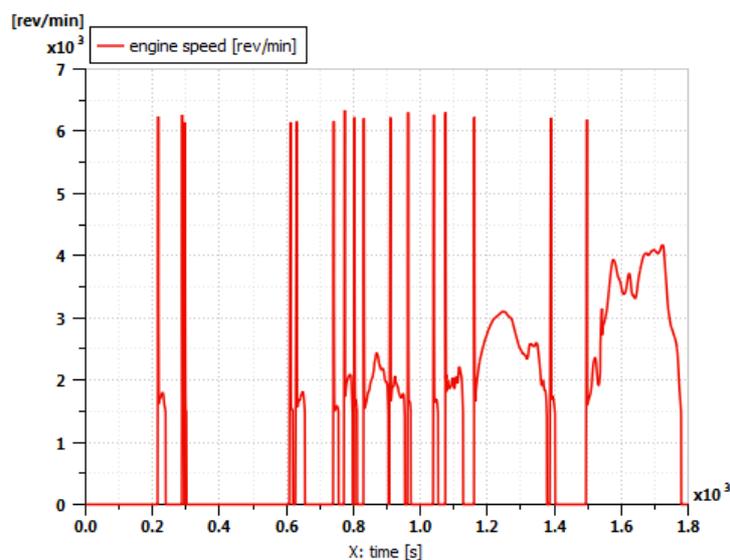


Fig. 4.8: Andamento velocità ICE.

La Fig.4.8 mostra l'andamento della velocità del motore termico. Il motore termico secondo la logica implementata nell'algoritmo del tool HOT viene utilizzato il meno possibile per ottenere un risparmio di combustibile specialmente nella prima parte del grafico in corrispondenza della parte del ciclo guida riferita al tratto urbano e la trazione dipende soltanto dal motore elettrico che effettua trazione puramente elettrica.

Nei tratti a seguire quando la richiesta di potenza è maggiore, il motore elettrico è impegnato a fornire potenza nei transitori di accelerazione e il motore termico fornirà potenza continuativa.

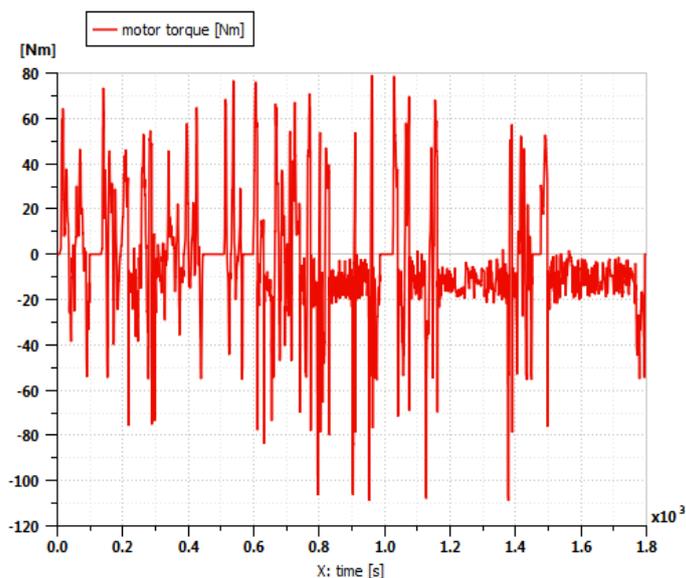


Fig. 4.9: Andamento della coppia di MOT.

Dal diagramma in Fig.4.9 è possibile notare che il motore termico ha coppia negativa che implica la presenza del freno motore.

Più importante sarà la presenza della coppia negativa del motore elettrico la quale è utilizzata per il funzionamento della frenata rigenerativa e non solo.

Nei tratti a ad alta velocità e quando la batteria lo richiede, la potenza del motore termico non solo viene utilizzata per la propulsione ma anche per la ricarica.

In corrispondenza di tali tratti si nota un aumento della quantità dello stato di carica a prova del fatto che la batteria si sta rigenerando.

La curva in Fig.4.10 mostra l'andamento dello stato di carica SOC [%] si nota dunque che alla fine del ciclo guida si ottiene uno stato di carica accettabile ai fini dell'algoritmo, molto vicino a quello di partenza circa 67 [%].

Dal grafico si nota che il motore elettrico è stato utilizzato abbondantemente in quanto si ottiene un profilo di stato di carica a forma di vasca da bagno con un andamento della parte centrale che tende a crollare per poi risalire nella parte finale del ciclo di guida in corrispondenza delle frenate di maggiore entità che portano alla rigenerazione della batteria e grazie ad un surplus di potenza del motore termico.

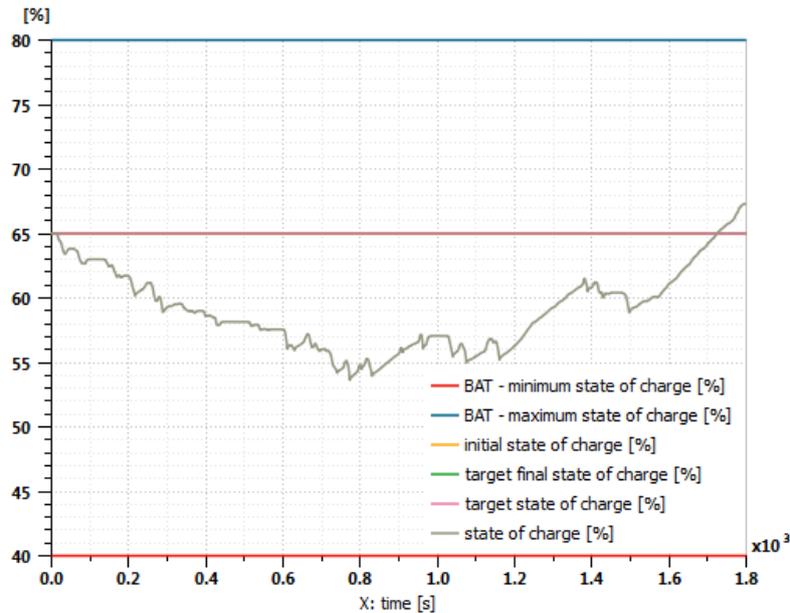


Fig. 4.10: Andamento dello stato di carica della batteria.

L'andamento del consumo di combustibile, curva proporzionale alla velocità del motore termico riporta dei picchi verticali in corrispondenza dell'avviamento del motore termico di circa 6 e 7 [g/s]. Per il resto della simulazione si mantiene attorno un range di 2 [g/s] nella fase urbana e circa 3.5 [g/s] nella fase extraurbana.

L'andamento della potenza richiesta dall'intero powertrain si suddivide in quantità di potenza che viene fornita dalla batteria e quella dal combustibile. Per evidenziare la suddivisione tra le due fonti di energia è ripotata la potenza elettrica della batteria nel tempo in Fig.4.11. Si nota come nei primi istanti temporali si utilizza sostanzialmente come fonte primaria la batteria data la potenza positiva.

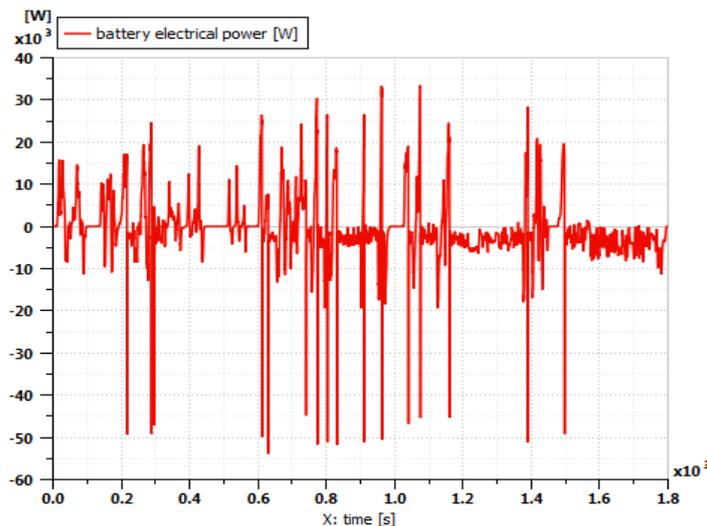


Fig. 4.11: Andamento della potenza elettrica della batteria.

La Fig.4.12 riporta il cambio di marcia ottimizzato dall'algorithm, ovvero il profilo ottenuto per ridurre il consumo di combustibile considerando la perdita di potenza dovuta alla penalità inserita nella parte destinata alla driveability. Il profilo risulta molto schematico con pochi cambi di marcia, in seguito sono state effettuate diverse simulazioni con l'obiettivo di andare a notare come viene influenzato lo stato di carica della batteria con l'aumento delle penalità e

di una diversa logica di cambio marcia. Dall'analisi si nota che il veicolo per la prima parte ha una propulsione puramente elettrica dato che è selezionata il modo 0. Dall'ingrandimento si nota che il modo 1 che corrisponde alla condizione più gravosa non viene selezionata dato che non si hanno pendenze durante il ciclo di guida selezionato e per raggiungere il modo 5 si ha un salto tra i modi di funzionamento secondo la sequenza inserita.

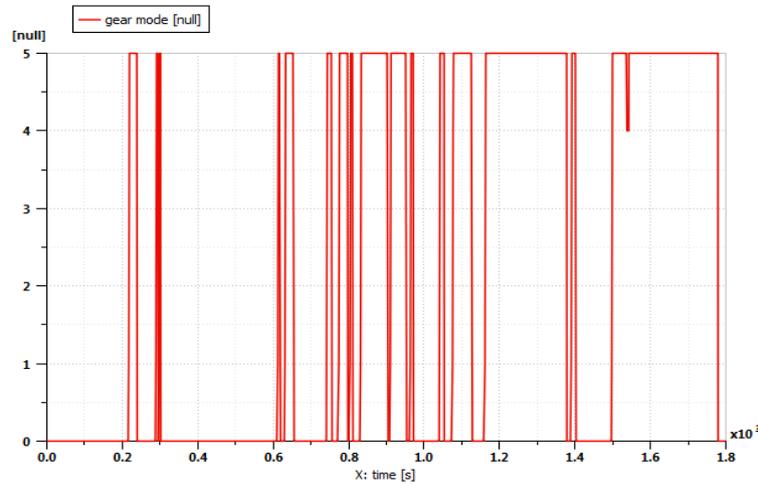


Fig. 4.12: Andamento del cambio di marcia.

Inoltre il fattore di equivalenza ottimo pari a 3 e il consumo di combustibile corretto pari a 6.28 [l/100km] un valore più alto di quello ottenuto dall'architettura serie con range extender. I punti di funzionamento sono osservati attraverso la Fig.4.13 e Fig.4.13. Il tool cerca di ottimizzare il più possibile il motore per farlo lavorare in una zona a più basso consumo di combustibile, ma non è sempre possibile dato che è strattamente connesso alle ruote. È interessante osservare i punti di funzionamento ad elevata velocità e coppia che corrispondo ai punti di funzionamento del motore elettrico con velocità elevata e coppia negativa. Questo per sottolineare il funzionamento da generatore nelle condizioni di ricarica da parte del motore termico quando è portato a lavorare a potenze elevate. In questo caso la coppia del motore elettrico si trova sulla curva di minima coppia e per certi casi essa è portata a saturazione.

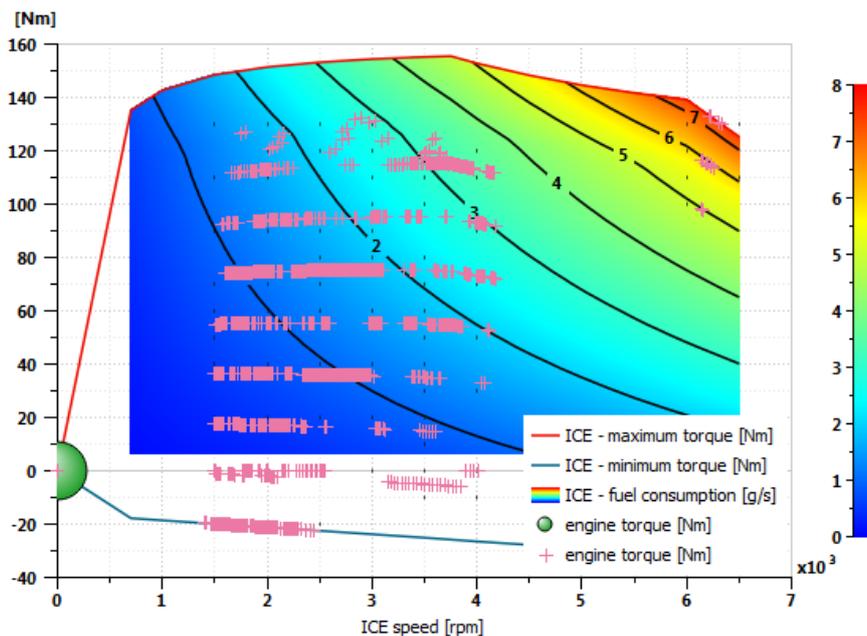


Fig. 4.13: Punti di funzionamento ICE.

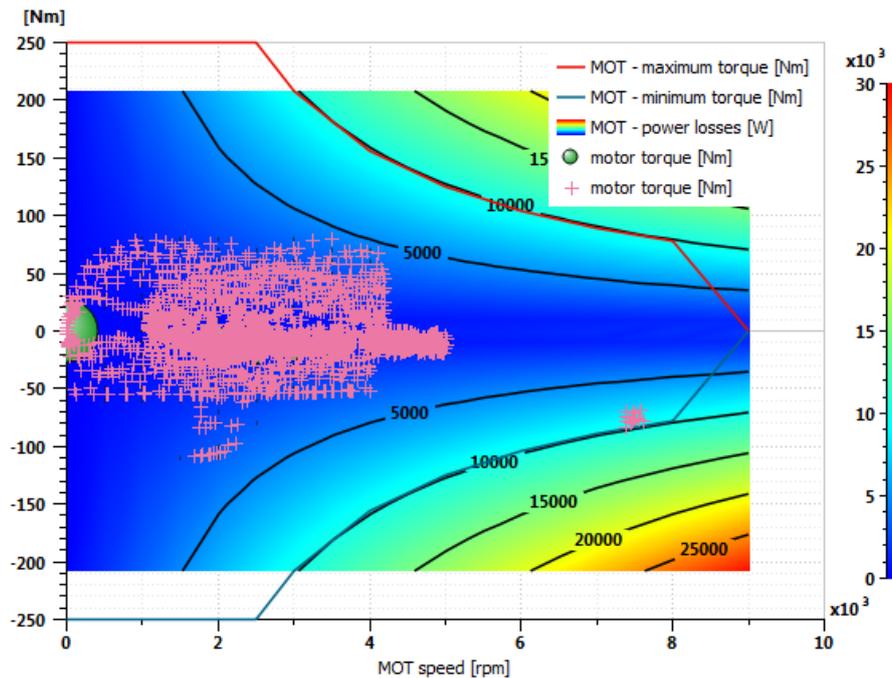


Fig. 4.14: Punti di funzionamento MOT.

Assieme ai risultati ottenuti è possibile ricavare anche un file file.ecms, che rappresenta una mappa con le informazioni ottenute da andare ad applicare all'interno di una centralina specifica ECMS durante la simulazione on-line su strada.

Questa gestione energetica in tempo reale per HEV è ottenuta grazie ad un algoritmo on-the-fly per la stima del fattore di equivalenza in base alle condizioni di guida. L'idea principale è di aggiornare periodicamente il parametro di controllo in base al carico stradale corrente, in modo che lo stato di carica della batteria sia mantenuto entro i limiti e il consumo di carburante sia ridotto al minimo.

4.1.1 Analisi con diverse metriche di driveability

	1° simulazione (color rosso)	2° simulazione (color blu)	3° simulazione (color giallo)
Penalità per accensione motore termico:	1000 [W]	0 [W]	5000 [W]
Penalità per spegnimento motore termico:	500 [W]	0 [W]	700 [W]
Penalità dovuta alla trasmissione e cambio marcia:	500 [W]	0 [W]	2500 [W]
Tempo durante il quale la penalità dell'accensione motore rimane attiva:	4 [s]	0 [s]	5 [s]
Tempo durante il quale la penalità dello spegnimento motore rimane attiva:	2[s]	0 [s]	3 [s]

Tabella 4.1: Penalità per tre diverse simulazioni.

I risultati ottenuti dalla simulazione sono riportati :

La velocità del motore termico e del motore elettrico è la stessa a meno di piccole variazioni non considerate importanti per cui si può fare riferimento alle figure riportate in precedenza.

Tutte e tre le simulazioni nonostante portino differenti penalità sull'accensione e spegnimento del motore termico, esso si accende e si spegne lo stesso numero di volte, 16, per cui possiamo affermare che è necessario avviare il motore termico in quei punti e il solo incremento della penalità porta ad maggiori perdite e in corrispondenza aumento del consumo.

Invece la Fig.4.15 mostra l'andamento della coppia del motore termico, si evince che mentre l'andamento delle curve a media e minore penalità sono pressoché identiche, quella a maggiore penalità porta delle differenze nella parte del ciclo ad alta velocità.

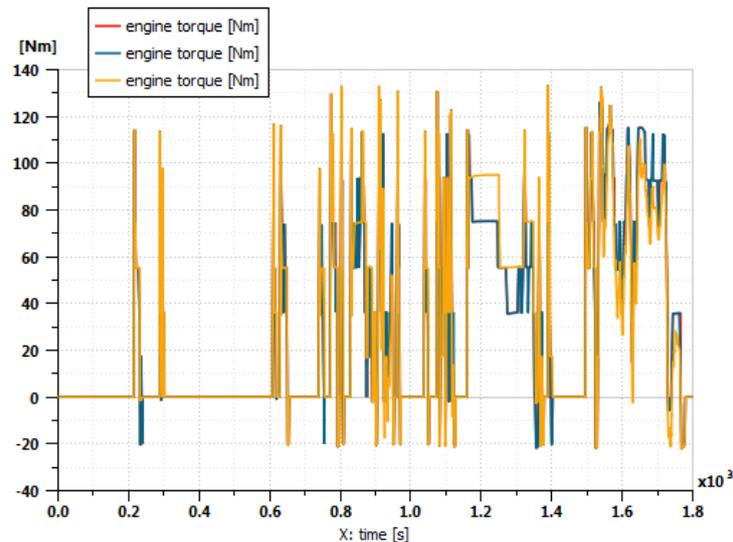


Fig. 4.15: Andamento coppia ICE per le tre simulazioni.

La Fig.4.16 mostra invece l'andamento della coppia del motore elettrico nel tempo. Una differenza sostanziale si nota nella parte finale dell'arco temporale della simulazione dedicata alla zona extraurbana. Mentre con le curve a media e penalità nulla si assiste alla rigenerazione della batteria gestita dal motore termico, con la curva a maggiore penalità questo non avviene in funzione del fatto che si ottiene una curva di cambio marcia differente come è possibile apprezzare in Fig.4.18 , che limita questo modo di funzionamento.

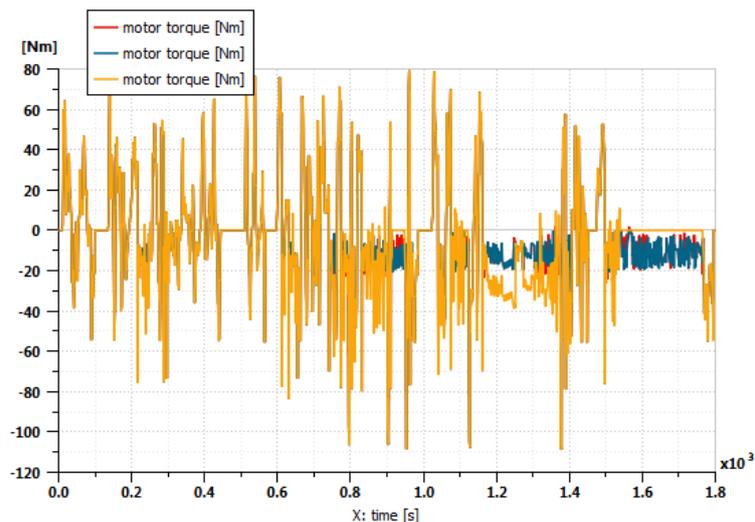


Fig. 4.16: Andamento coppia MOT per le tre simulazioni.

La Fig.4.16 riporta l'andamento dello stato di carica della batteria SOC. L'andamento della

curva blu e rossa è circa identica, le penalità iniziano a diventare importanti successivamente infatti con la curva gialla si ha una curva di stato di carica che cambia sostanzialmente soprattutto nella seconda parte del ciclo. Infatti si ha un rapido incremento dello stato di carica dovuto al funzionamento di rigenerazione batteria con motore termico, subito dopo si assiste ad un utilizzo della macchina elettrica come motore a supporto del termico nei transitori e come macchina generatrice per la rigenerazione della batteria in frenata. Dal punto di vista dell'algoritmo tutte e tre le simulazioni raggiungono una convergenza e un valore accettabile di SOC finale.

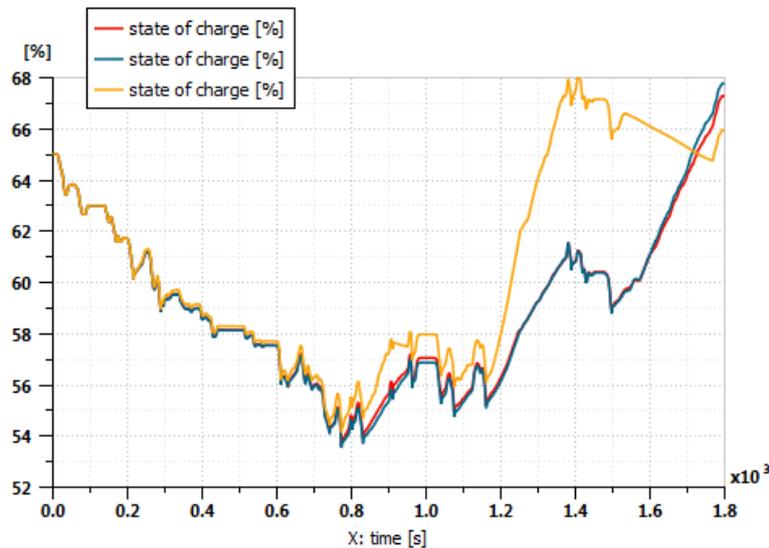


Fig. 4.17: Andamento stato di carica della batteria per le tre simulazioni.

I consumi istantanei non riportano molte differenze tanne tra le due curve estreme ad alta e bassa penalità soprattutto nella parte di ciclo riferita al tratto extraurbano. Vi sono dei picchi verticali di consumo dovute all'accensione del motore termico, sono gli stessi analizzati precedentemente.

Le curve del cambio marcia in Fig.4.18 non sono molto diversificate, le curve a penalità minore e intermedia presentano lo stesso numero di cambio di marcia, 98, mentre la curva a penalità maggiore riporta 2 cambi di marcia in meno, 96. In particolare ciò che differenzia la curva a bassa e media penalità da quella ad alta penalità è la gestione della 4 e 5 marcia. La curva gialla tende a rimanere per più tempo nella 4 marcia creando un segnale a gradino mentre le altre due seguono un transitorio più veloce e solo di passaggio. Questo porta ad avere una influenza sulla rigenerazione della batteria, limitando in alcuni casi la ricarica mediante il motore termico e la frenata rigenerativa nella parte riservata all'uso extraurbano.

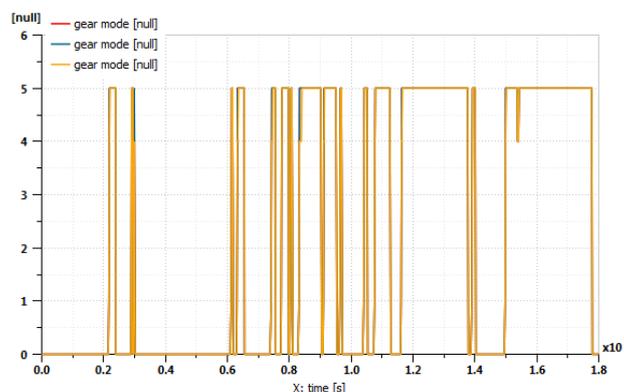


Fig. 4.18: Andamento del cambio di marcia per le tre simulazioni.

Quindi ricapitolando nelle tre simulazioni con differenti penalità, si ha lo stesso numero di accensioni del motore, perché obbligato dalla richiesta di potenza e la sua diretta connessione alle ruote, a contrario di ciò che si otteneva nel veicolo serie provvisto di cambio di velocità. Il numero di cambi marcia anche in questo caso varia, e per la penalità bassa e media il numero di cambio marcia è il medesimo, mentre incrementando ancor più la penalità si nota avere 2 cambi di marcia in meno.

Nelle tre simulazioni il fattore di equivalenza ottimo è pari a 3 e rimane costante il peso della potenza elettrica su quella richiesta dal combustibile.

	1° simulazione (color rosso)	2° simulazione (color blu)	3° simulazione (color giallo)
Fattore di equivalenza s :	3 [-]	3 [-]	3 [-]
Consumo di combustibile:	6.39 [l/100km]	6.41 [l/100km]	6.48 [l/100km]
Consumo di combustibile corretto:	6.28 [l/100km]	6.28 [l/100km]	6.42 [l/100km]
Energia totale persa:	46.6 [MJ]	46.97 [MJ]	47.38 [MJ]

Tabella 4.2: Risultati delle tre simulazioni.

Dai risultati riportati in Tabella 4.2 possiamo dunque dire con certezza che un aumento della penalità un peggioramento sulla energia totale persa e di conseguenza sul consumo di combustibile corretto.

Per quanto consegue, analizziamo i punti di funzionamento sulle caratteristiche delle tre macchine. La caratteristica del motore termico in Fig.4.19 presenta dei cerchi concentrici che stanno a spiegare la frequenza con cui si raggiungono tali punti.

È importante notare che il cerchio rosa, corrispondente al caso con maggiore penalità sull'origine degli assi ha una estensione uguale a quella degli altri casi a prova del fatto che le penalità in questo caso non hanno un ruolo importante sull'accensione e spegnimento del motore termico.

È utile notare come i punti in rosso, condizione peggiore si posizionano sulla curva di coppia minima, attuando la condizione di freno motore.

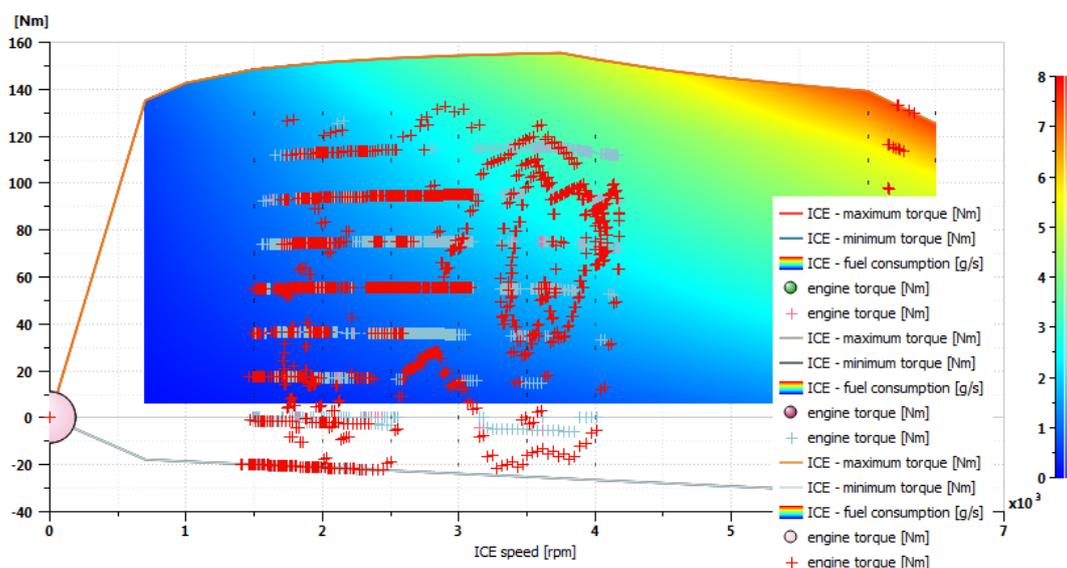


Fig. 4.19: Punti di funzionamento ICE per le tre simulazioni.

La caratteristica in Fig.4.20 mostra i punti di funzionamento del motore elettrico nei tre casi.

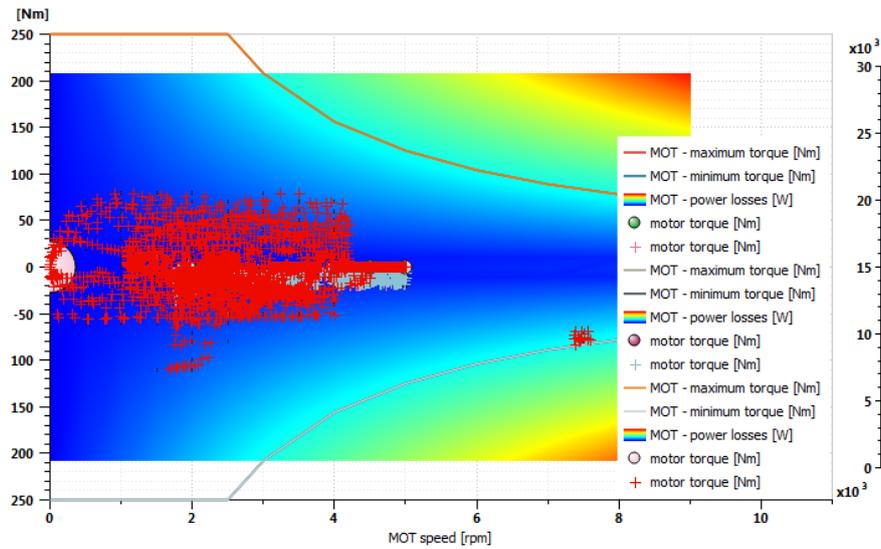


Fig. 4.20: Punti di funzionamento MOT per le tre simulazioni.

4.1.2 Analisi su ciclo WLTC ridotto

Inoltre per capire quanto può incidere la parte di ciclo extraurbano sul consumo di combustibile corretto, come nel caso serie, è stato considerato il medesimo veicolo e con logica di driveability riferita al primo caso, penalità intermedia, ed è stata eseguita una simulazione fino al tempo 1000 [s] considerando solo gli 8 [km] del ciclo urbano escludendo la parte ad alta velocità. Una seconda simulazione è stata eseguita considerando a parità di spazio percorso la parte di ciclo extraurbano.

Dai risultati delle simulazioni, Tabella 4.3, si può affermare che si ha un incremento dei consumi pari al 43.6 [%] se lo stesso veicolo (che viene utilizzato per 8 km su un percorso urbano) percorre altrettanti chilometri su un percorso extraurbano.

	WLTC Parte urbana	WLTC Parte extraurbana
Spazio percorso [km]	8	8
Consumo combustibile corretto [l/100km]	4.63	8.21

Tabella 4.3: Confronto consumi per percorso urbano e extraurbano.

4.2 Simulazione e ottimizzazione del veicolo su strada

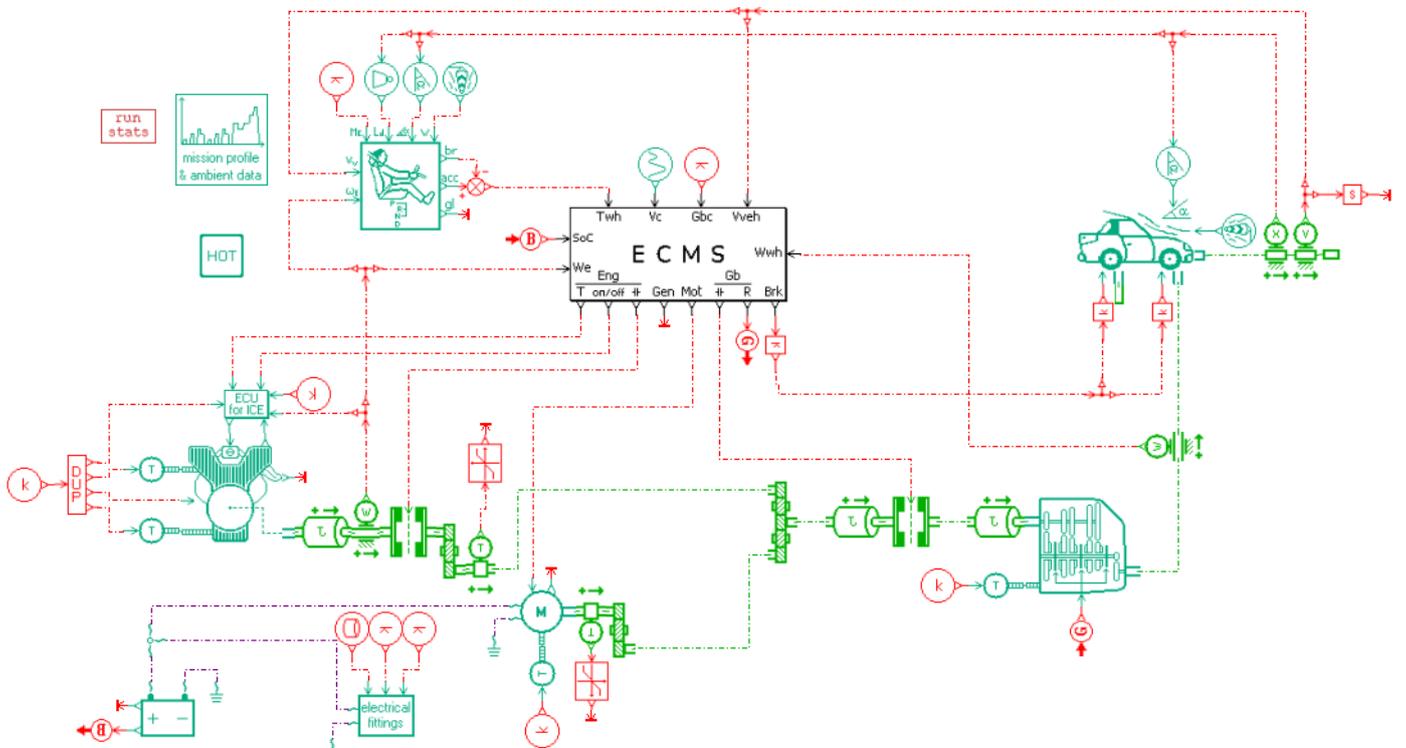


Fig. 4.21: Modello sviluppato di veicolo ibrido parallelo.

Il modello completo è costituito dai sottomodelli ampiamente descritti nel capitolo dedicato alle librerie principali:

- Motore termico;
- Driver;
- Vehicle index;
- Motore elettrico/ Generatore;
- Pacco batterie;
- Missione profilo;
- Centralina veicolo ECMS;
- Controllo motore termico ECU;
- Cambio di velocità.

Vi sono anche sotto modelli secondari:

- Riduttori di velocità;
- Sensori di velocità, velocità angolare e coppia;
- Blocchi per operazioni logiche;
- Blocchi per segnali;
- Sistema di ramificazione per il collegamento tra i vari sotto modelli.

4.2.1 ECMS

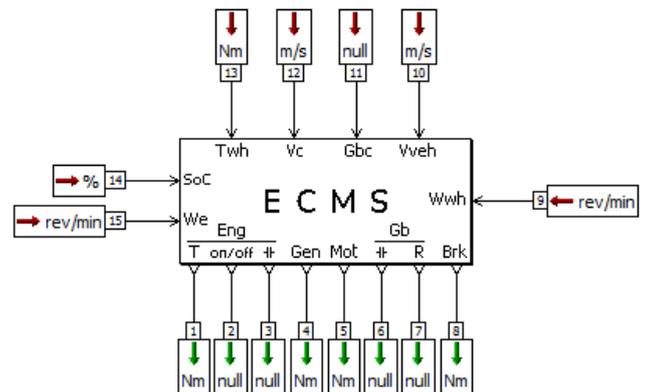
Una particolare attenzione invece deve essere rivolta alla parte centrale e cuore del modello, la centralina con logica ECMS, Equivalent Consumption Minimization Strategy. L'obiettivo di questo controller è trovare la strategia ottimale che minimizzi il consumo di carburante del veicolo.

Segnali in ingresso:

- Porta 9 Velocità alle ruote;
- Porta 10 Velocità veicolo ;
- Porta 11 Comando cambio marcia Driver;
- Porta 12 Velocità ciclo guida;
- Porta 13 Richiesta di coppia alle ruote Driver;
- Porta 14 Percentuale SOC in arrivo dalla batteria;
- Porta 15 Velocità di rotazione motore termico;

Segnali in uscita:

- Porta 1 Comando coppia motore termico;
- Porta 2 Comando accensione motore termico;
- Porta 3 Comando apertura frizione;
- Porta 4 Comando coppia generatore;
- Porta 5 Comando coppia motore elettrico;
- Porta 6 Comando apertura frizione cambio;
- Porta 7 Comando cambio marcia;
- Porta 8 Comando coppia di frenata;



L'ECMS si basa sulla nozione che, nei veicoli elettrici ibridi a sostegno della carica, la differenza tra lo stato di carica iniziale e finale della batteria è piccola, trascurabile rispetto all'energia totale utilizzata. Ciò significa che il sistema di accumulo dell'energia elettrica viene utilizzato solo come un buffer di energia: ovvero, tutta l'energia proviene dal carburante e la batteria può essere vista come un serbatoio di carburante ausiliario reversibile. Qualsiasi energia elettrica immagazzinata utilizzata durante una fase di scarica della batteria deve essere ripristinata in una fase successiva utilizzando carburante dal motore o attraverso la frenata rigenerativa. Per cui potremmo considerare due casi:

- Potenza della batteria positiva, fase di scarica: ciò implica che in futuro sarà necessario ricaricare la batteria, con conseguente ulteriore consumo di carburante. Il consumo di combustibile necessario per ripristinare lo stato di carica della batteria dipende esclusivamente dalla condizione operativa del motore al momento della ricarica della batteria; e dalla quantità di energia che può essere recuperata dalla frenata rigenerativa. Entrambi i fattori dipendono a loro volta dal carico del veicolo e quindi dal ciclo di guida;
- Potenza della batteria negativa, fase di carica: l'energia elettrica immagazzinata verrà utilizzata per alleggerire il carico del motore necessario per soddisfare il

carico del veicolo, portando ad un risparmio istantaneo di carburante. Anche in questo caso, l'uso di energia elettrica come sostituto dell'energia del combustibile dipende dal carico imposto dal ciclo di guida.

La logica implementata dall'ECMS è illustrato in Fig.4.22 a cui si fa riferimento ad un HEV parallelo.

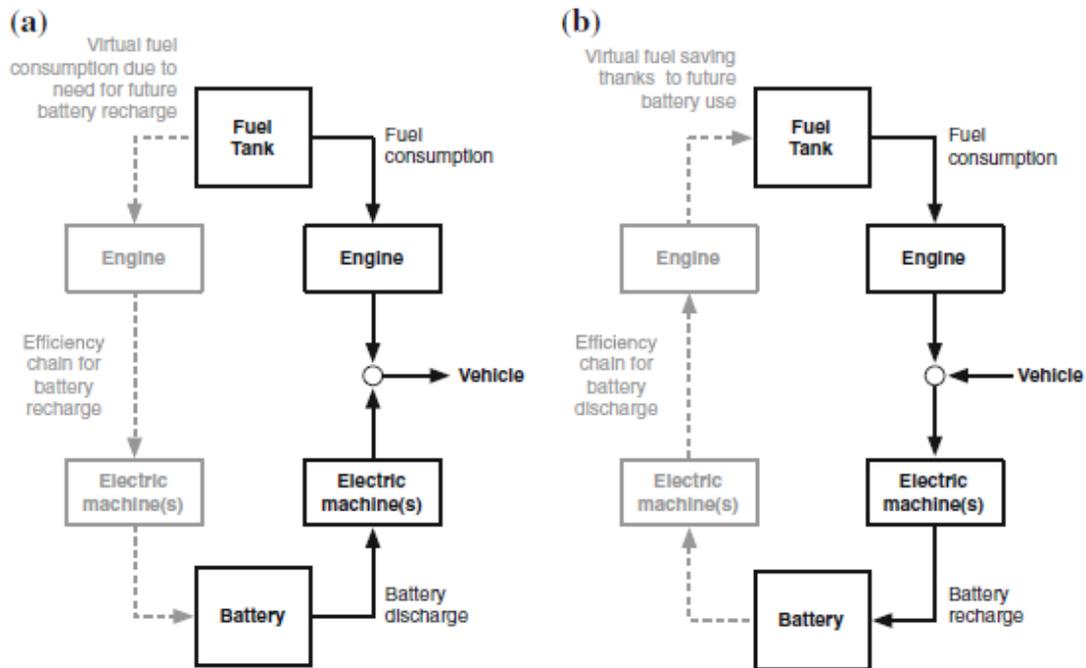


Fig. 4.22: Schema a blocchi rappresentativo della logica ECMS.

Nel primo caso a sinistra (a) il motore elettrico fornisce potenza meccanica e la batteria si scarica. Il percorso tratteggiato mostra il ritorno e il ripristino futuro dell'energia elettrica utilizzata per riportare lo stato di carica a livello iniziale. Nel secondo caso (b) il motore elettrico riceve energia meccanica e la converte in energia elettrica immagazzinata nella batteria, ad esempio durante una frenata rigenerativa. Il percorso tratteggiato mostra l'uso futuro di questa energia elettrica per produrre energia meccanica. Questa quantità di energia meccanica non dovrà essere prodotta dal motore ed è considerata un risparmio di carburante.

L'idea alla base dell'ECMS è che un consumo di carburante equivalente variabile può essere associato all'uso di energia elettrica, cioè l'energia elettrica ha un costo ad essa associato anche quando l'obiettivo principale è di minimizzare l'uso di carburante.

Il consumo di carburante equivalente futuro (o passato), $m_{r_{ess}}(t)$ [g / s], può essere sommato all'attuale consumo reale di carburante - flusso di combustibile $\dot{m}_f(t)$ [g / s], per ottenere l'equivalente istantaneo consumo di carburante:

$$m_{f_{equ}}(t) = m_{r_{ess}}(t) + \dot{m}_f(t)$$

Per analogia a un motore che consuma carburante reale, il suo consumo istantaneo di carburante è dato:

$$\dot{m}_f(t) = \frac{P_{eng}}{\eta_{eng}(t) H_{LHV}}$$

- $\eta_{eng}(t)$ è l'efficienza del motore termico variabile nel tempo e ricavabile dalla mappa di efficienza;
- P_{eng} è la potenza erogata dal motore termico;
- H_{LHV} è il potere calorifero inferiore del combustibile.

La macchina elettrica consuma invece un carburante virtuale pari ad:

$$\dot{m}_{ress}(t) = sf c_{eqv}(t) P_{batt}(t) = \frac{s(t)}{H_{LHV}} P_{batt}(t)$$

- $sf c_{eqv}(t)$ è il consumo specifico virtuale di combustibile [g/kWh], Il consumo di carburante specifico virtuale è proporzionale al fattore di equivalenza $s(t)$ che differisce se la batteria viene caricata o scaricata;
- $P_{batt}(t)$ è la Potenza della batteria e può essere negativa o positiva, se in fase di ricarica o scarica.

Il fattore di equivalenza $s(t)$ rappresenta la catena di efficienze attraverso cui il combustibile viene trasformato in energia elettrica e viceversa. In quanto tale, cambia per ogni condizione operativa del powertrain e come vedremo in seguito diviene un parametro dinamico in funzione dello stato di carica. Nella formulazione originale dell'ECMS ovvero nella logica implementata all'interno del tool HOT, il fattore di equivalenza è una costante, o piuttosto un insieme di costanti che può essere interpretato come l'efficienza globale media del percorso elettrico (per ogni modalità operativa, ad esempio, carica o scarica) per un ciclo di guida specifico. A seconda del segno di $P_{batt}(t)$, la portata del carburante virtuale può essere positiva o negativa, rendendo così il consumo di carburante equivalente superiore o inferiore al consumo effettivo di carburante.

Usando l'ECMS il problema globale di minimizzare il costo totale si riduce in un problema di minimizzazione locale e istantaneo.

In ogni istante di tempo il valore di consumo di combustibile equivalente viene calcolato secondo l'equazione precedente, il problema viene sviluppato in forma di potenza P_{eqv} secondo l'equazione (simile alla funzione costo Hemiltoniana a meno del rendimento della batteria che deve essere moltiplicato al fattore di equivalenza in fase di carica e diviso in fase di scarica):

$$P_{eqv}(t) = \dot{m}_f(t) H_{LHV} + s(t)P_{batt}(t)$$

e per ogni candidato della variabile di controllo $P_{batt}(t)$ viene di conseguenza scelto il suo valore che minimizza il consumo di combustibile equivalente e la rispettiva potenza.

Le fasi che devono essere seguite per implementare la logica di ECMS sono rappresentati in Fig.4.23.



Fig. 4.23: Fasi implementate nella logica ECMS.

Algoritmo :

1. Dato lo stato del sistema e noti $P_{req}(t)$, w_{engi} , w_{moti} , SOC_i , s_0 . . , identificare il range di controllo accettabile $[P_{batt\ min}(t) . . , P_{batt\ max}(t)]$ che soddisfa i vincoli istantanei (potenza, coppia, limiti di corrente) delimitate dalle curve caratteristiche;
2. Discretizza l'intervallo $[P_{batt\ min}(t) . . , P_{batt\ max}(t)]$ in un numero finito di candidati al controllo;
3. Particolare attenzione al valore di $s_i(t)$ ottenuto mediante un controllo adattativo sullo stato di carica (vedere A-ECMS). Grazie ai dati noti calcolare il consumo di carburante equivalente corrispondente a ciascun candidato di controllo;
4. Selezionare il valore di controllo $P_{batt}(t)$ che minimizza $m_{f\ equ}(t)$ o la rispettiva potenza $P_{eqv}(t)$ (nel nostro caso verrà utilizzata in termini di potenza).
5. Infine ricaviamo i valori di coppia da fornire agli attuatori.

I passaggi da 1 a 4 sono calcolati in ogni istante di tempo per l'intera durata del ciclo di guida.

Questo approccio ha dimostrato di avvicinarsi molto alla soluzione ottimale globale.

Inoltre, il problema di minimizzazione istantanea è costituita da una computazione più semplice rispetto al problema globale risolto con la programmazione dinamica e applicabile alle situazioni del mondo reale poiché non si basa (esplicitamente) sulle informazioni sulle condizioni di guida future.

Un valore costante del fattore di equivalenza, deve essere selezionato in anticipo (mediante il tool HOT). In pratica, dato un valore di $s(t)$ variabile in un certo range, è possibile pre-calcolare la combinazione di macchina elettrica e potenza del motore (o coppia) in grado di soddisfare la richiesta di potenza (o coppia) del veicolo con il consumo di carburante equivalente istantaneo minimo.

Nelle implementazioni pratiche, il SOC finale potrebbe non raggiungere esattamente il valore obiettivo: pertanto, al fine di confrontare equamente i risultati del consumo di carburante per diversi veicoli, è consuetudine correggere il valore effettivo del consumo di carburante tenendo conto della quantità netta di variazione di energia nella batteria, cioè, sempre riconducendo i risultati ad un range di mantenimento della carica accettabile.

Inoltre l'ECMS non conosce il ciclo di guida a priori, si tratta di un calcolo on-line, a differenza del HOT, che effettua un calcolo preliminare e ripetitivo su tutto il ciclo di guida per ottimizzare la strategia.

Considerando che una strategia implementabile in tempo reale non può mantenere le condizioni di guida future come note, dovrebbe essere predisposto uno schema di adattamento per il fattore di equivalenza e regolare il valore di questo parametro al variare delle condizioni di guida. Gli Energy Management Strategy che eseguono questo tipo di adattamento online sono indicati in letteratura come strategia di minimizzazione del consumo equivalente adattivo (A-ECMS). In particolare nel caso della centralina in esame viene utilizzato un adattamento basato sul feedback da SOC.

Negli approcci A-ECMS che utilizzano il feedback SOC, l'idea principale è di aggiornare dinamicamente il valore del fattore di equivalenza usando i metodi di controllo di feedback classici basati sulla differenza tra il SOC corrente e un riferimento predefinito che viene

mantenuto costante. I principali vantaggi degli approcci A-ECMS basati sul feedback del SOC sono la robustezza e il basso carico computazionale rispetto ad altre tecniche di controllo, ma ha come svantaggio che l'adattamento continuo potrebbe non essere sempre auspicabile in quanto impedirebbe di utilizzare la batteria nell'intero intervallo SOC. Ciò è dovuto al fatto che anche piccole deviazioni dal valore di riferimento verranno corrette immediatamente.

Tale metodo può essere espresso mediante lo schema in Fig.4.24 e l'equazione:

$$s(t) = s_0 + ds = s_0 - c_1 (SOC(t) - SOC_{tar}) - c_2 \int_0^t (SOC(t) - SOC_{tar}) dt$$

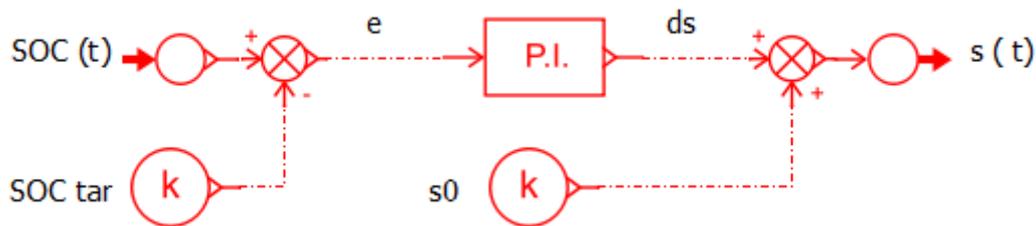


Fig. 4.24: Schema PID per correzione errore SOC.

Infatti se lo SOC è vicino al limite inferiore della batteria il fattore s aumenterà, ovvero aumenta il peso della potenza elettromeccanica che il motore termico fornisce alla batteria, per evitare che lo SOC vada al di sotto del limite e si abbia una scarica profonda che può portare ad un danneggiamento e riduzione della vita utile della batteria.

Se lo stato di carica è vicino al limite superiore, il fattore s diminuisce riducendo la quantità del flusso di potenza del motore termico verso la batteria, si riduce quindi anche la quantità di combustibile utilizzata. Tutto questo avviene sempre con l'obiettivo di salvaguardare il limite di sovraccarico e quindi la vita della batteria.

Per modificare il valore del fattore s istantaneo, di volta in volta, durante il ciclo si utilizza un correttore PI. Vi è il coefficiente proporzionale c_1 in funzione della differenza tra SOC istantaneo e SOC di target e il coefficiente integrativo c_2 in funzione dell'integrale della differenza di SOC.

Nello strumento HOT, il fattore s_0 è il risultato dell'ottimizzazione per una configurazione del veicolo e un ciclo di guida, con il vincolo di ottenere un SOC finale molto vicino al SOC finale target.

Nella simulazione ECMS il fattore s_0 è un parametro, ovvero il risultato dello strumento HOT, per la stessa configurazione del veicolo e per un ciclo di guida rappresentativo, e viene utilizzato come parametro di ingresso del correttore. Il fattore $s(t)$ nella logica ECMS viene calcolato in tempo reale ovvero per ogni istante di campionamento vengono applicate le stesse equazioni dell'algoritmo descritte nella libreria HOT, si aggiorna di volta in volta il fattore di equivalenza in funzione dello SOC(t). Il suo valore finale può essere diverso dal SOC finale di target, sta all'utente definire se questo valore di SOC risulta far parte di un range accettabile.

Tra i parametri interni che possono essere impostati ci sono due parametri di penalità per evitare il passaggio frequente tra le modalità. La prima è la penalità di avviamento del motore e viene utilizzata per evitare la frequente accensione e spegnimento del motore termico. La seconda è la penalità di potenza per il cambio di marcia. Questi due coefficienti hanno un ruolo importante nella scelta della strategia di comando. Più sono alti, meno è ottimizzato il

consumo di carburante durante il ciclo. Un problema comune riscontrato negli EMS che non incorporano esplicitamente le metriche di guidabilità nel loro indice di prestazione, è che le richieste inviate agli attuatori del gruppo propulsore al fine di ottimizzare il consumo di energia di bordo possono avere effetti negativi sulla guidabilità del veicolo.

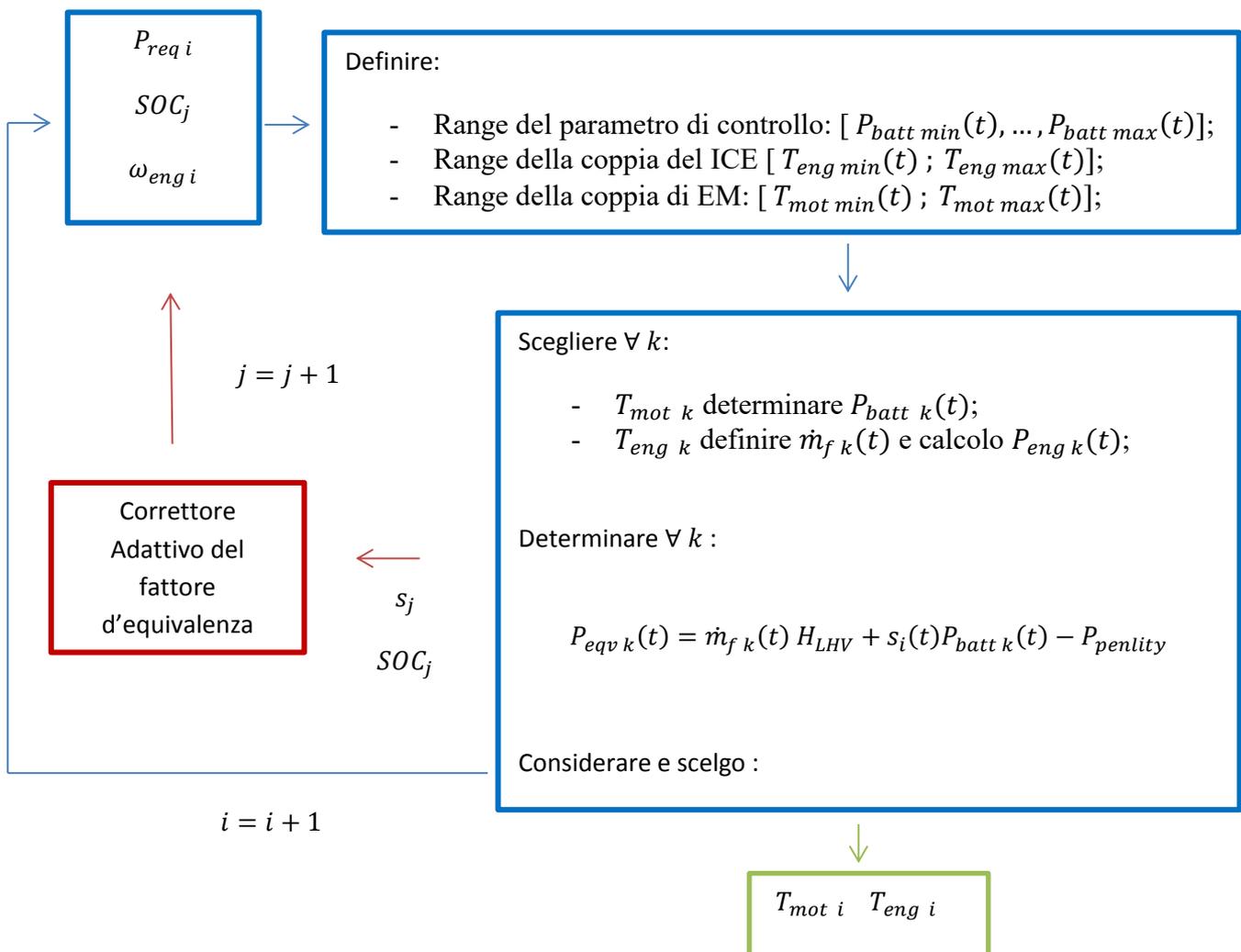
Le penalità e i coefficienti del PI contribuiscono a effettuare una simulazione coerente e il più possibile attinente alla realtà con dinamica, ritardi e segnali di retroazione.

Per il veicolo ibrido parallelo, la centralina da in uscita la coppia ottima del motore elettrico e termico che riduce al minimo il consumo di carburante del veicolo, e in entrata richiede la velocità del motore elettrico e termico in modo da effettuare sempre un controllo sulla potenza. La coppia che verrà fornita sarà quella calcolata effettuando il minimo della funzione costo.

La stessa funzione è una potenza e quindi le penalità introdotte sono anch'esse delle potenze che devono essere considerate come condizioni al primo calcolo della funzione, prima che si ricerchi il suo minimo.

Inoltre all'interno della centralina è possibile caricare un "file.ecms" che contiene tutti i risultati e dati dei componenti e ottimizzazione dello stesso veicolo eseguita mediante il tool HOT.

Di rilevante importanza è il parametro del cambio di marcia, se il cambio di marcia è stato scelto come una variabile e come parametro da andare a ottimizzare, il collegamento non deve essere fatto al driver ma ad una semplice costante in quanto la curva del cambio marcia ottimo può essere caricata all'interno del sotto modello e preso in considerazione dal modello di cambio inserito. Infine possiamo raggruppare tutta la logica implementata in questa mappa:



4.2.2 Risultati simulazione su strada

La Fig.4.25 riporta l'andamento della velocità veicolo e quella impostata dal ciclo guida. Si evince che l'inseguimento della velocità avviene in modo corretto con piccoli scostamenti, ritenuti accettabili.

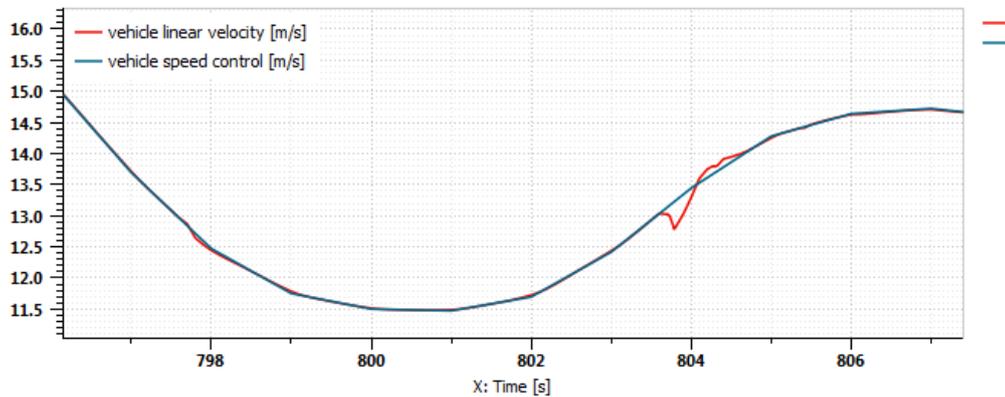


Fig. 4.25: Zoom e analisi inseguimento della velocità di riferimento.

La Fig.4.26 e la Fig.4.27 riporta l'analisi di inseguimento sull'accelerazione. A meno di alcuni picchi dell'accelerazione veicolo, dovuti essenzialmente all'operazione di cambio marcia, i profili risultano sovrapponibili. In seguito è riportata una analisi sul confort del veicolo e per la riduzione di questi picchi improvvisi di accelerazione.

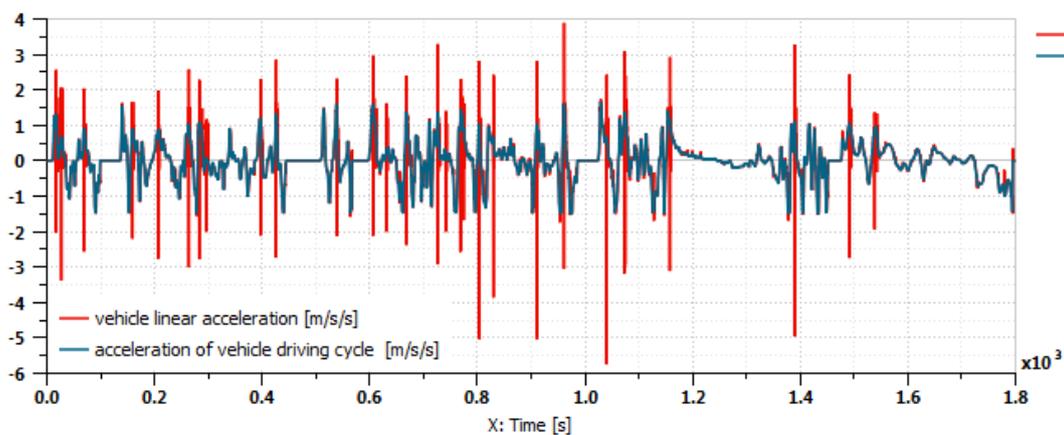


Fig. 4.26: Analisi inseguimento della accelerazione di riferimento.

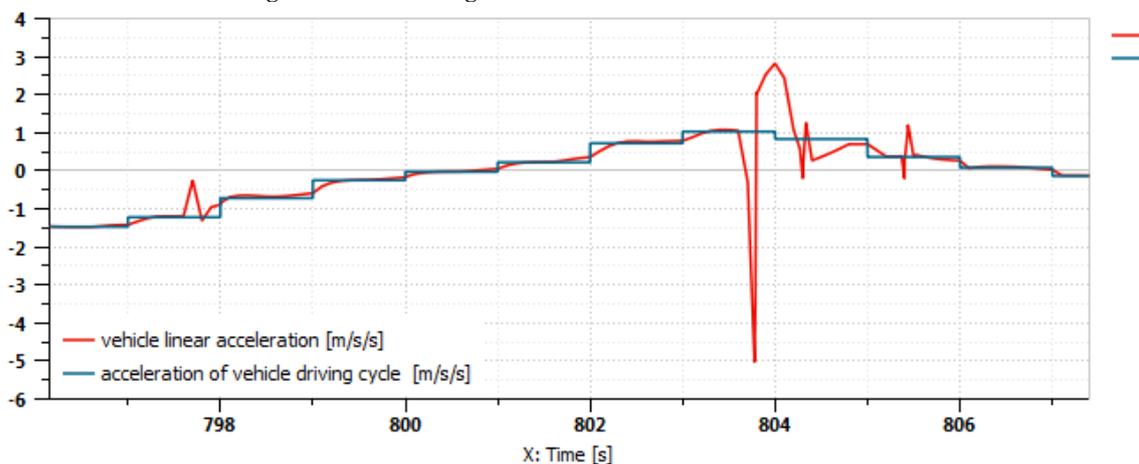


Fig. 4.27: Zoom e analisi inseguimento della accelerazione di riferimento.

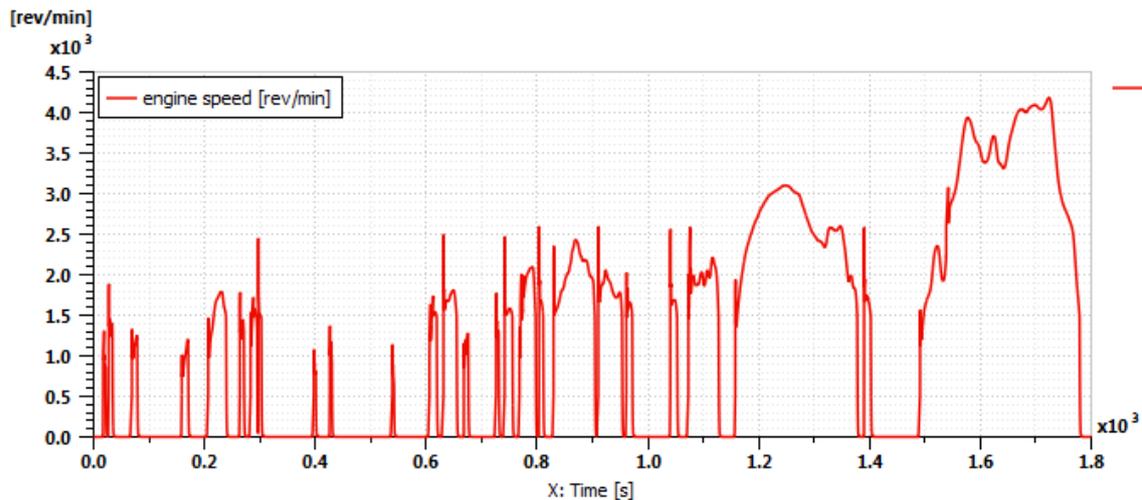


Fig. 4.28: Andamento velocità ICE.

In Fig.4.28 è riportato l'andamento di velocità del motore termico nell'arco temporale della simulazione. Si nota che il motore termico risulta spento per alcuni tratti iniziali consentendo la propulsione elettrica pura, per conferma di ciò si può considerare anche la Fig.4.29, ove è riportato l'andamento della velocità del motore elettrico.

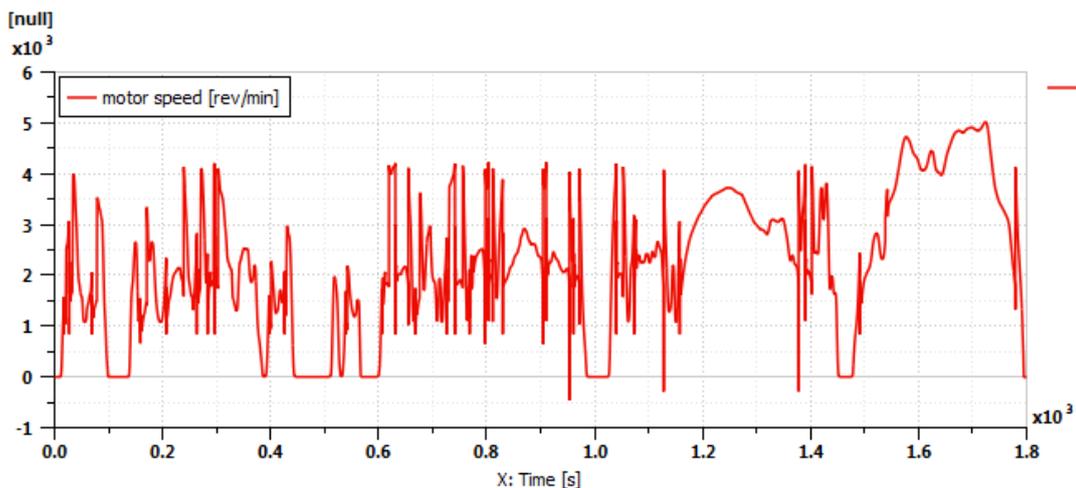


Fig. 4.29: Andamento velocità MOT.

Dalla analisi effettuate risulta che nella parte iniziale del ciclo guida il motore elettrico fornisce una coppia maggiore che nella seconda parte, questo è dovuta ad una saturazione della coppia ad alti numeri di giri, dunque nella parte extraurbana è il motore termico il propulsore principale fornendo una coppia continuativa. Il motore elettrico gestisce i transitori di accelerazione. Questo è possibile notarlo sulle curve della potenza riportata. Per quanto riguarda le potenze in gioco la Fig.4.30 mostra l'andamento della potenza del motore termico, la Fig.4.31 l'andamento della potenza del motore elettrico e la Fig.4.32 l'andamento della potenza in uscita dalla batteria, con la convezione adottata.

Particolare attenzione si deve alla potenza del motore elettrico. In alcuni tratti si nota che si ha potenza negativa anche dove non vi è frenata rigenerativa, la rigenerazione avviene per conto del motore termico che utilizza una quota di combustibile per ottenere potenza elettromeccanica facendo funzionare la macchina elettrica come generatore; questa funzione avviene perché ci troviamo in uno stato di carica della batteria distante da quello di target e il correttore cerca di ripristinare lo stato di carica desiderato.

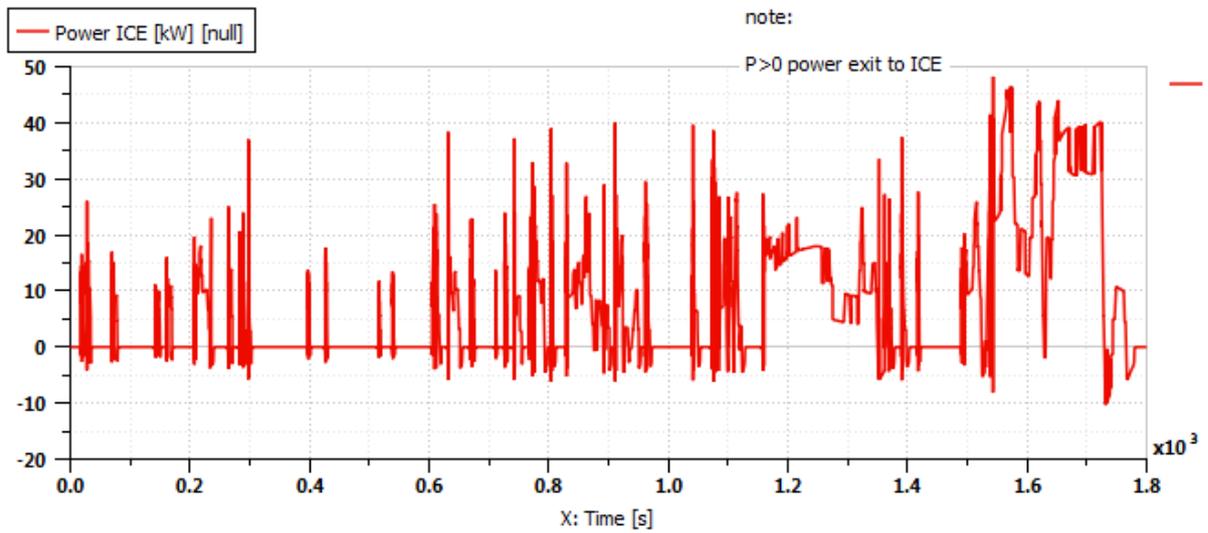


Fig. 4.30: Andamento potenza ICE.

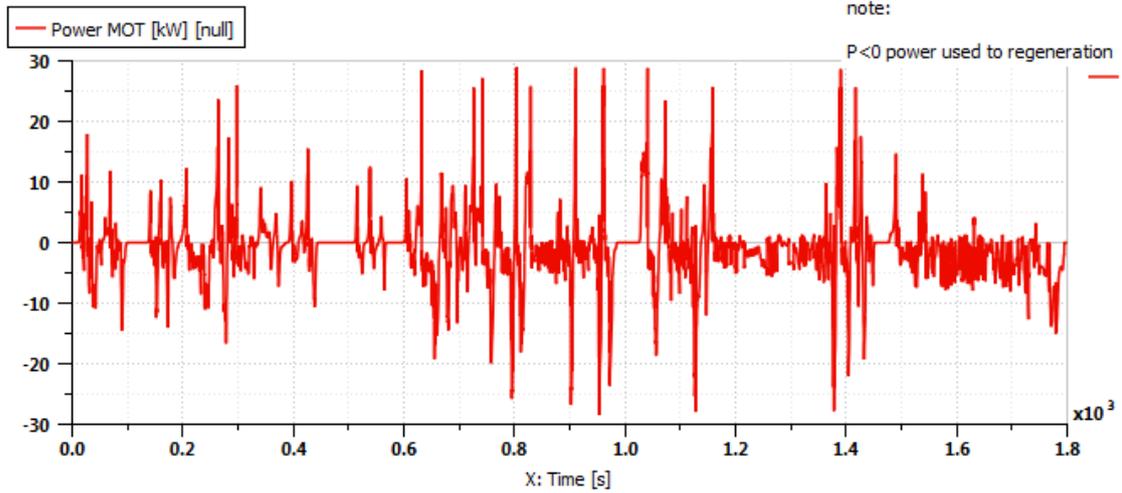


Fig. 4.31: Andamento potenza MOT.

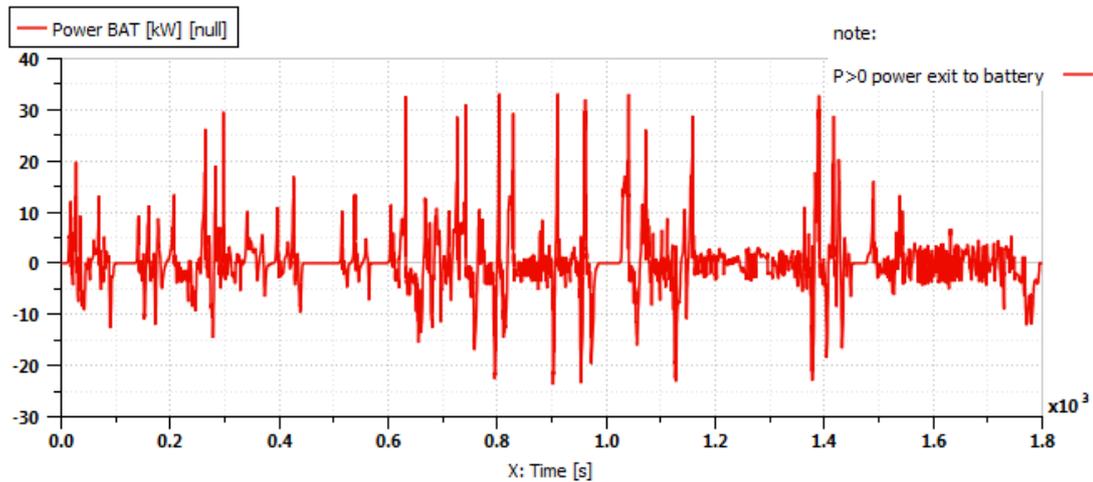


Fig. 4.32: Andamento potenza BAT.

La potenza della batteria negativa corrisponde alla quantità di potenza in entrata nella batteria, potenza rigenerata totale che tiene conto sia del contributo della frenata rigenerativa e sia della quantità di potenza meccanica del motore termico. Per esaminare a fondo la rigenerazione della batteria abbiamo effettuato analisi su coppia e potenza negativa del motore elettrico.

In Fig.4.33 è riportata l'analisi sulla frenata rigenerativa, sono rappresentate riportate alle ruote, la coppia richiesta dal driver per frenare, la coppia negativa del motore termico, la coppia dell'impianto frenante e infine la sola quantità di coppia negativa del motore elettrico dovuta alla frenata rigenerativa; nella Fig.4.34 vi è il confronto delle due quantità di coppia negativa del motore elettrico, quella dovuta alla frenata rigenerativa e quella dovuta alla ricarica mediante il motore termico. Dal grafico precedente, si evince come il maggior contributo della frenata è dovuta al motore elettrico e gli altri due sistemi intervengono con quantità di coppia inferiore. È interessante notare, come nell'analisi effettuata nell'architettura serie, che il sistema frenante interviene in modo particolare quando a causa di un aumento della pendenza della curva di velocità e decelerazione il motore elettrico non riesce ad compensare la frenata. Per un'analisi più dettagliata è stato eseguito uno zoom in Fig.4.35 che rappresenta l'arco temporale finale della simulazione.

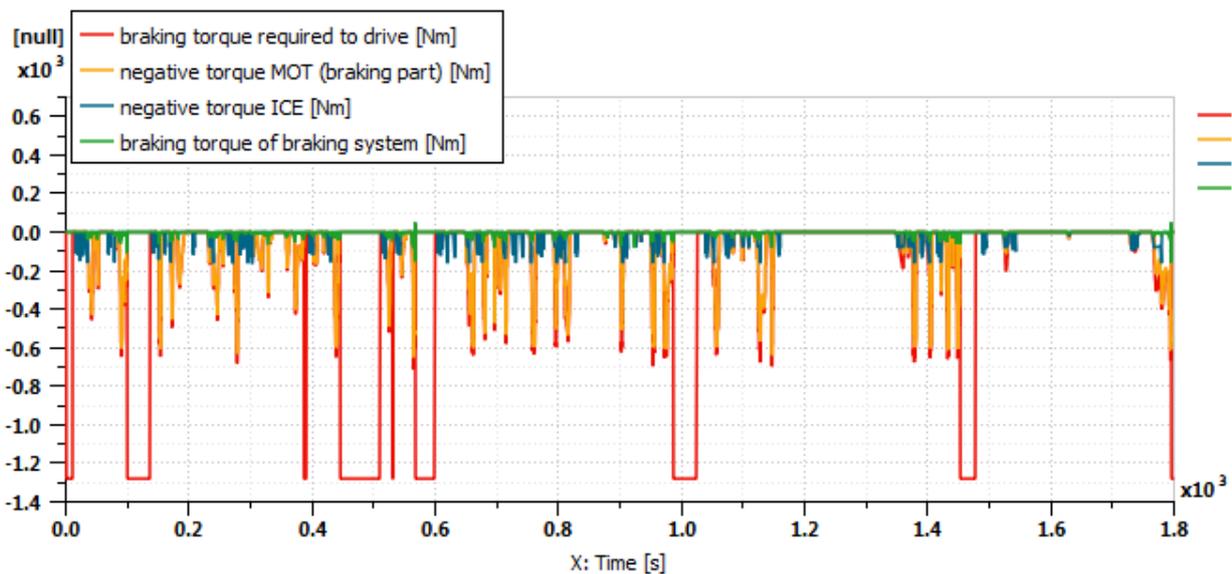


Fig. 4.33: Andamento coppie per analisi frenata rigenerativa.

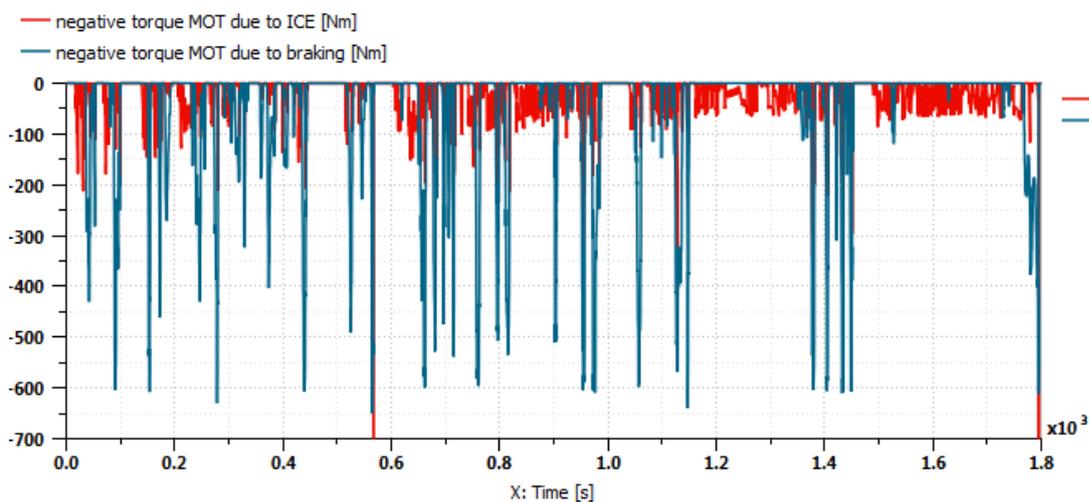


Fig. 4.34: Andamento della coppia MOT dovuta alla rigenerazione mediante frenata e rigenerazione mediante ICE.

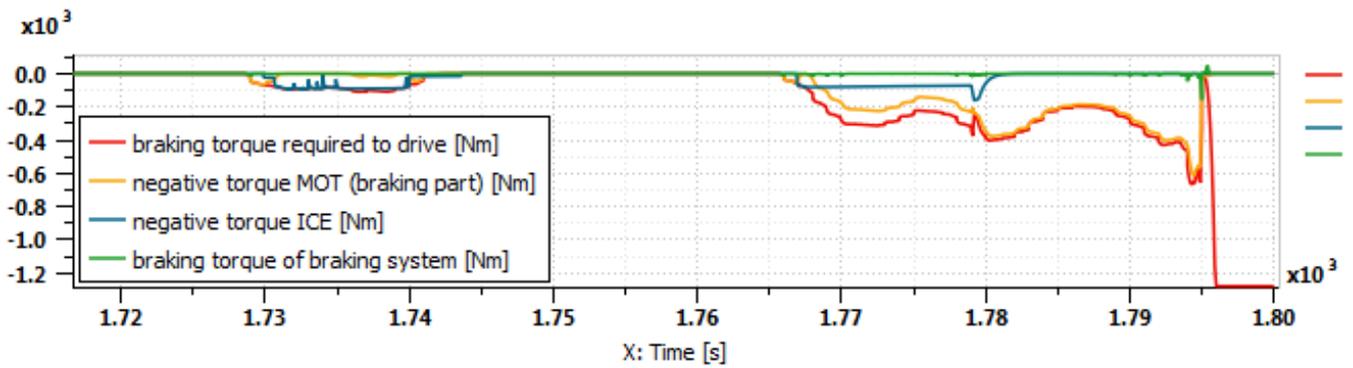


Fig. 4.35: Zoom andamento delle coppie destinate all'analisi sulla frenata rigenerativa.

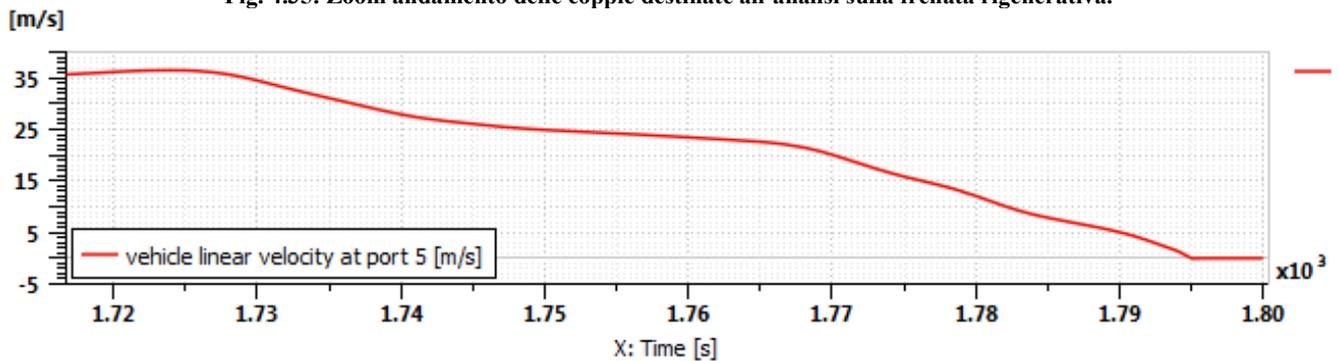


Fig. 4.36: Zoom dell'andamento della velocità di riferimento veicolo.

Per quantificare la quantità di potenza che può essere, a meno del rendimento di conversione, trasformata in energia elettrica si è riportato in Fig.4.37 l'analisi sulle potenze calcolate a ridosso delle ruote. Il diagramma mostra come la quantità di potenza richiesta per frenare viene compensata dal contributo globale di tutti e tre i sistemi descritti, in modo particolare dal motore elettrico.

La potenza rigenerata dal motore elettrico mostrata è solo il peso della potenza rigenerata mediante la frenata. Ci sarebbe anche la quota di potenza che viene rigenerata mediante il contributo del ICE quando lo stato di carica della batteria è al di sotto di quello di target e interviene il correttore del fattore di equivalenza, le due quote di potenza distinte sono riportate in Fig.4.38. Il diagramma riporta una maggiore rigenerazione da parte del ICE nella zona riservata al ciclo extraurbano.

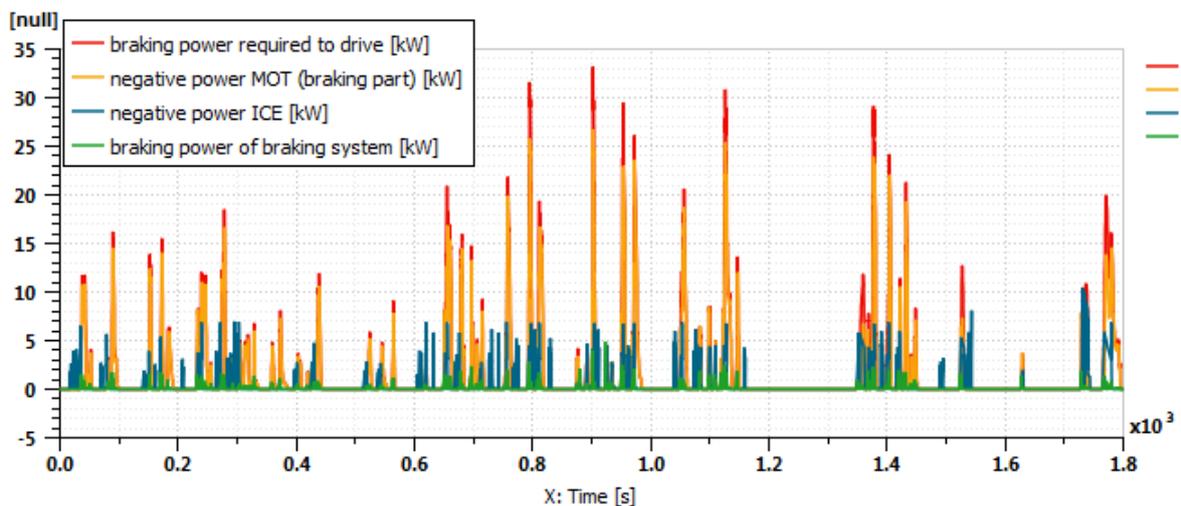


Fig. 4.37 Andamento della potenze destinate alla frenata del veicolo utile per analisi sulla potenza rigerata.

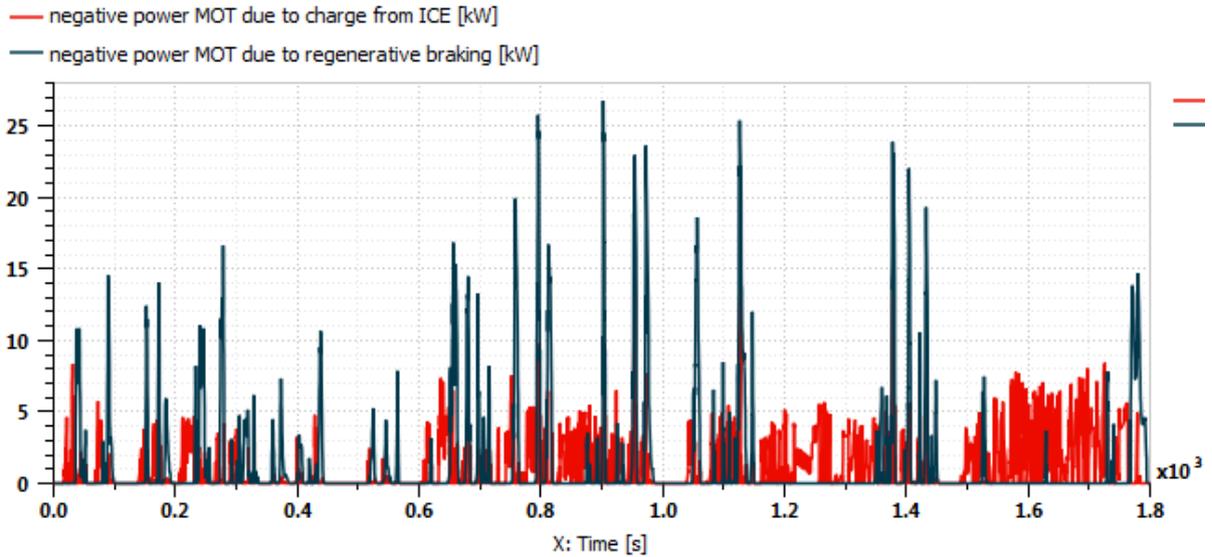


Fig. 4.38: Andamento delle potenze MOT negative destinate alla rigenerazione della batteria, derivanti da due fenomeni differenti.

La Fig. 4.39 descrive l'andamento del cambio marcia corretto per minimizzare il consumo di combustibile considerando le perdite di potenza inserite e utilizzando la nuova convenzione rispetto al HOT precedente. In questo caso la centralina ECMS seleziona la marcia 2 come quella corretta per la propulsione elettrica, infatti comparato con la velocità del motore termico, esso risulta essere spento quando si seleziona di questa marcia. La Fig.4.40 mostra uno zoom per mostrare l'andamento del cambio marcia.

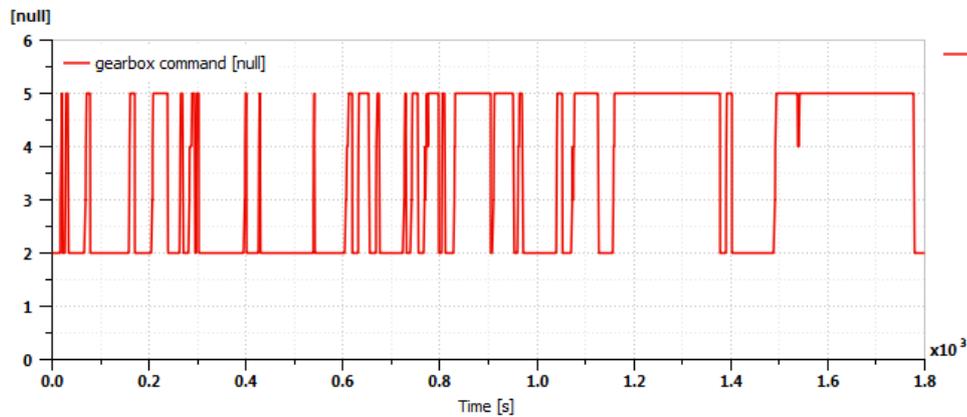


Fig. 4.39: Andamento del cambio di marcia veicolo.

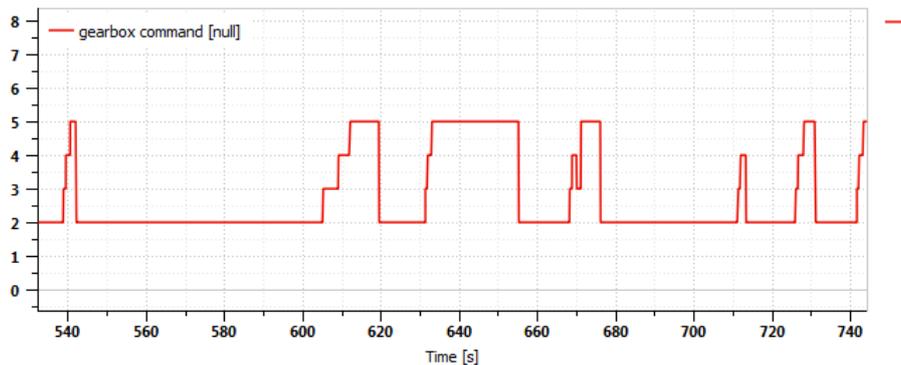


Fig. 4.40: Zoom dell'andamento cambio di marcia veicolo.

In Fig. 4.41 è rappresentato l'andamento dello stato di carica della batteria, mentre il fattore di equivalenza variabile è riportato in Fig.4.42 . Il fattore di equivalenza diminuisce quando il valore di SOC aumenta e viceversa. Si verifica la proporzionalità inversa tra i due parametri visualizzati a conferma della logica A-ECMS.

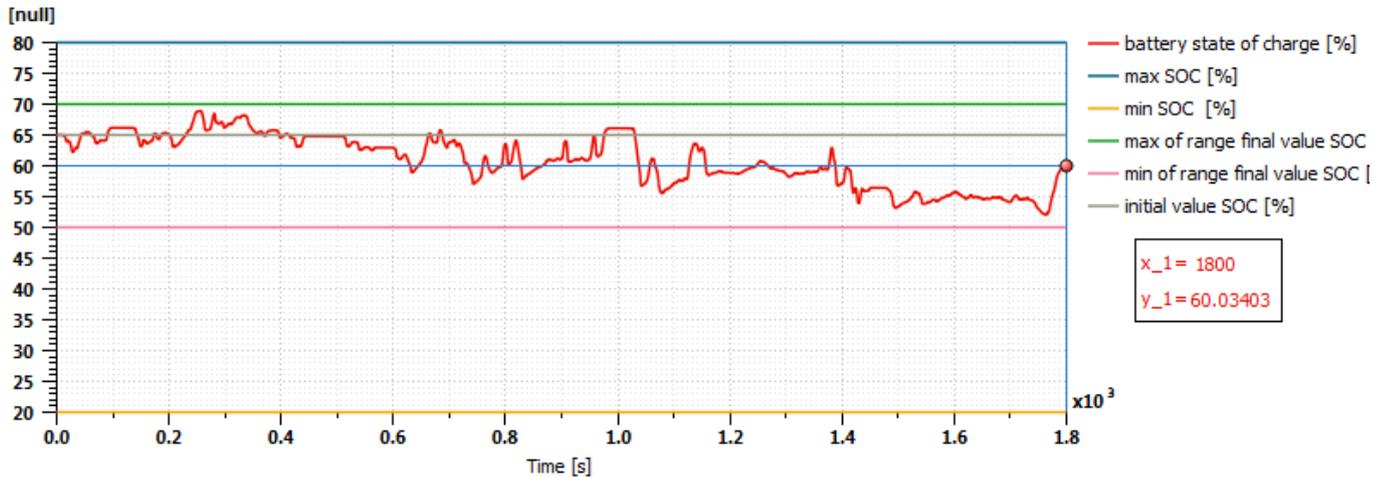


Fig. 4.41: Andamento dello stato di carica della batteria.

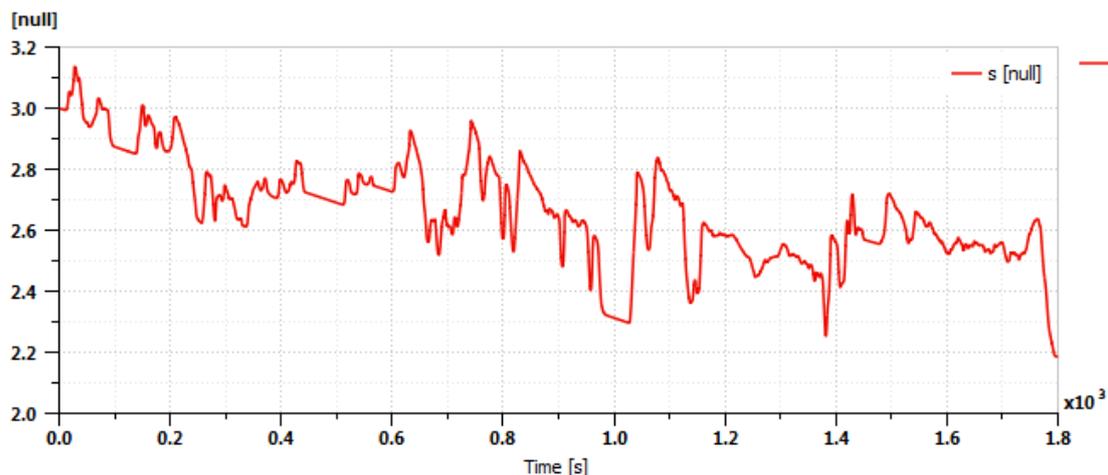


Fig. 4.42: Andamento del fattore di equivalenza.

In Fig.4.43 sono riportati i punti di funzionamento del motore elettrico, si nota che la maggior parte dei punti è condensata ad ottimo rendimento seppur non massimo.

Si potrebbe optare di avere un motore elettrico con una caratteristica di coppia differente, coppia massima più bassa e coppia costante fino ad un numero di giri più basso, questo porterebbe a lavorare in dei punti ad un più alto rendimento sul piano quotato.

Di conseguenza però avremo una potenza a bordo veicolo più bassa e una minore coppia a bassi numeri di giri ed il veicolo non potrebbe essere in grado di garantire buone prestazioni al di fuori dal ciclo di guida, inoltre così facendo si dà al motore termico un peso maggiore sulla trazione.

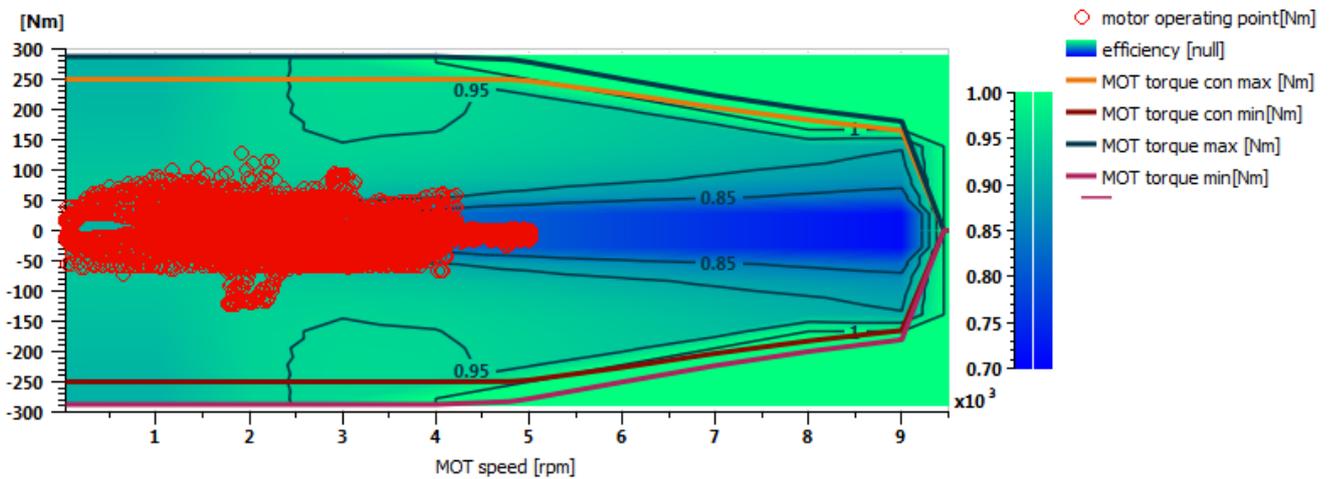


Fig. 4.43: Punti di funzionamento MOT.

I punti di funzionamento del motore termico ICE sono riportati in Fig.4.44 . In questo tipo di configurazione non è possibile inserire una curva di Economic Line nel sistema e farlo lavorare nei suoi punti di ottimo, dato il vincolo cinematico con le ruote. Si evince che nonostante questa imposizione la maggior parte dei punti di funzionamento si trova a ridosso delle isoline a minor consumo, quindi si può affermare il corretto controllo della logica ECMS implementata.

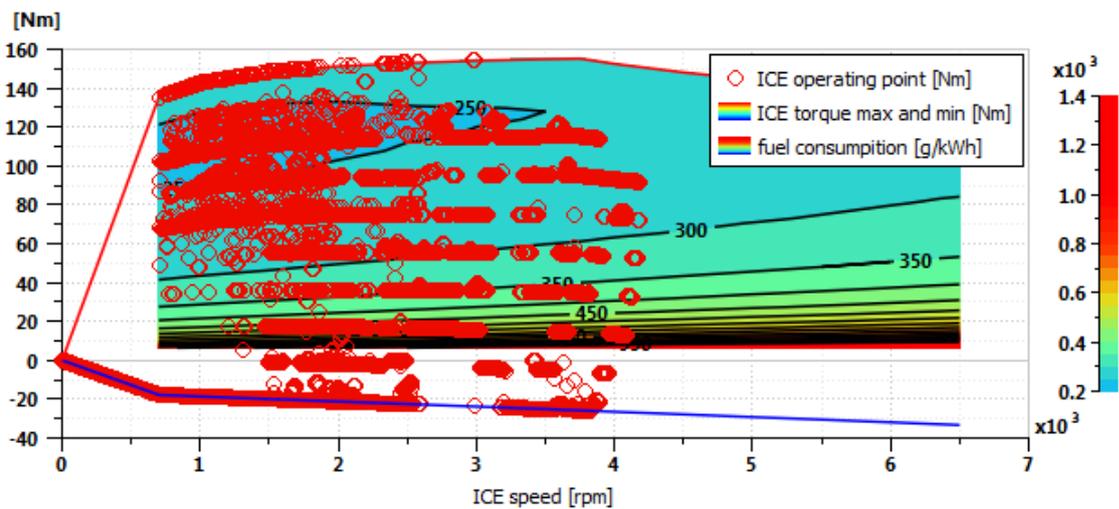


Fig. 4.44: Punti di funzionamento ICE.

Infine sono riportate le quantità in grammi del carburante utilizzato e la stima delle emissioni di anidride carbonica prodotte in grammi, Tabella 4.4. Le quantità risultano essere superiori rispetto l'architettura serie.

Consumo di combustibile cumulato	1057 [g]
Anidride carbonica cumulata	3331 [g]

Tabella 4.4 : Risultati consumi della simulazione.

4.2.3 Analisi sul cambio marcia e miglioramento del comfort

Il modello è stato creato e analizzato per effettuare analisi sulla architettura del veicolo ibrido, studiare i flussi di potenza, valutare il suo ottimo funzionamento. La simulazione è molto veloce rispetto ad una manovra realistica e con frequenze molto alte oltre i 20 Hz, il che evita di poter analizzare a fondo gli aspetti riguardanti il comfort e in particolare la dinamica associata all'apertura e chiusura della frizione (ideale modellato utilizzando il modello di Coulomb con tangente iperbolica) e attuazione del cambio di marcia.

La centralina fornisce alla frizione un segnale molto rapido di apertura e chiusura e il cambio marcia viene eseguito istantaneamente. Ogni qual volta viene eseguita questa operazione si ha un discostamento dell'andamento della accelerazione del veicolo rispetto a quella del ciclo guida. Sostanzialmente si può notare la formazione dei picchi di accelerazione sia positivi che negativi che provocano delle forti oscillazioni al veicolo e una cattivo comfort a bordo.

In Fig.4.45 è riportato un esempio di apertura della frizione, cambio marcia e in seguito il picco di accelerazione descritto.

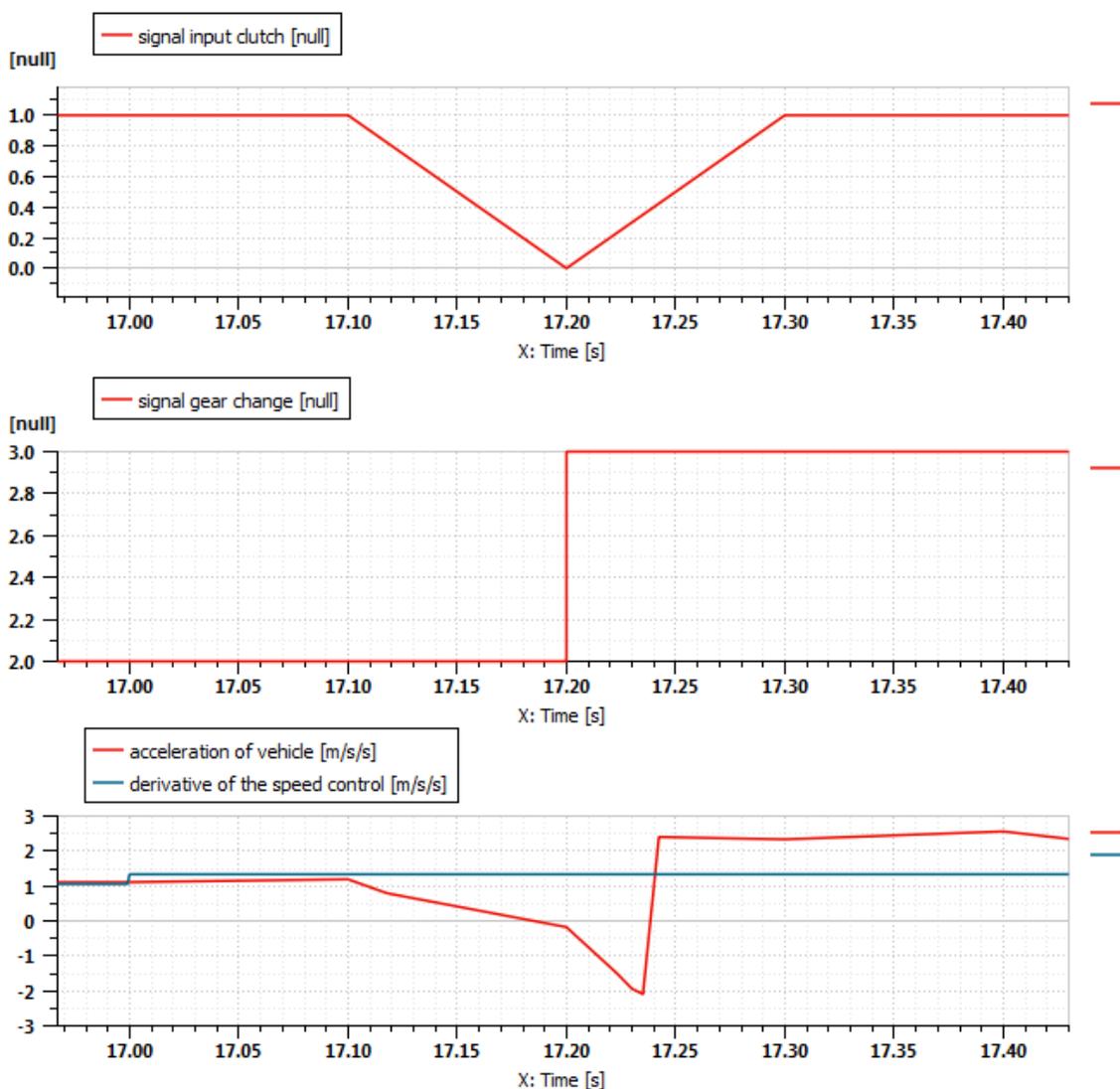


Fig. 4.45: Prima figura mostra segnale di apertura frizione, seconda figura cambio di marcia, terza figura accelerazione veicolo in corrispondenza del cambio marcia.

Si è voluto effettuare un'analisi per ridurre il più possibile questi spike di accelerazione dunque si è curato di apertura della frizione e del cambio marcia che la centralina fornisce. La Fig.4.46 mostra la soluzione al problema dei picchi indesiderati di accelerazione e coppia. L'invio di un segnale che non sia a punta come in precedenza, ma molto più squadrato e l'aggiunta di un pianerottolo che prolunga la chiusura fa in modo non solo di effettuare in maniera corretta l'adesione tra il primitivo del cambio e l'asse a monte ma di evitare la discontinuità nella coppia trasmessa e quindi nell'accelerazione.

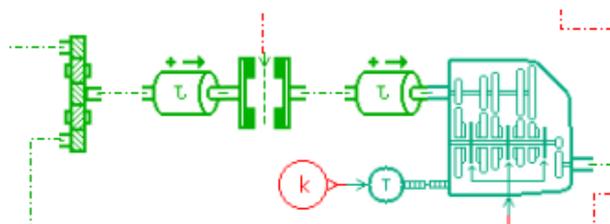


Fig. 4.46: Schema rappresentativo frizione e cambio di velocità.

In Fig.4.47 possiamo osservare il nuovo segnale di apertura della frizione e cambio di marcia, con andamento più lento, che riduce il picco negativo di accelerazione portandolo ad essere circa nullo e annulla il picco di accelerazione positiva che si otteneva in precedenza.

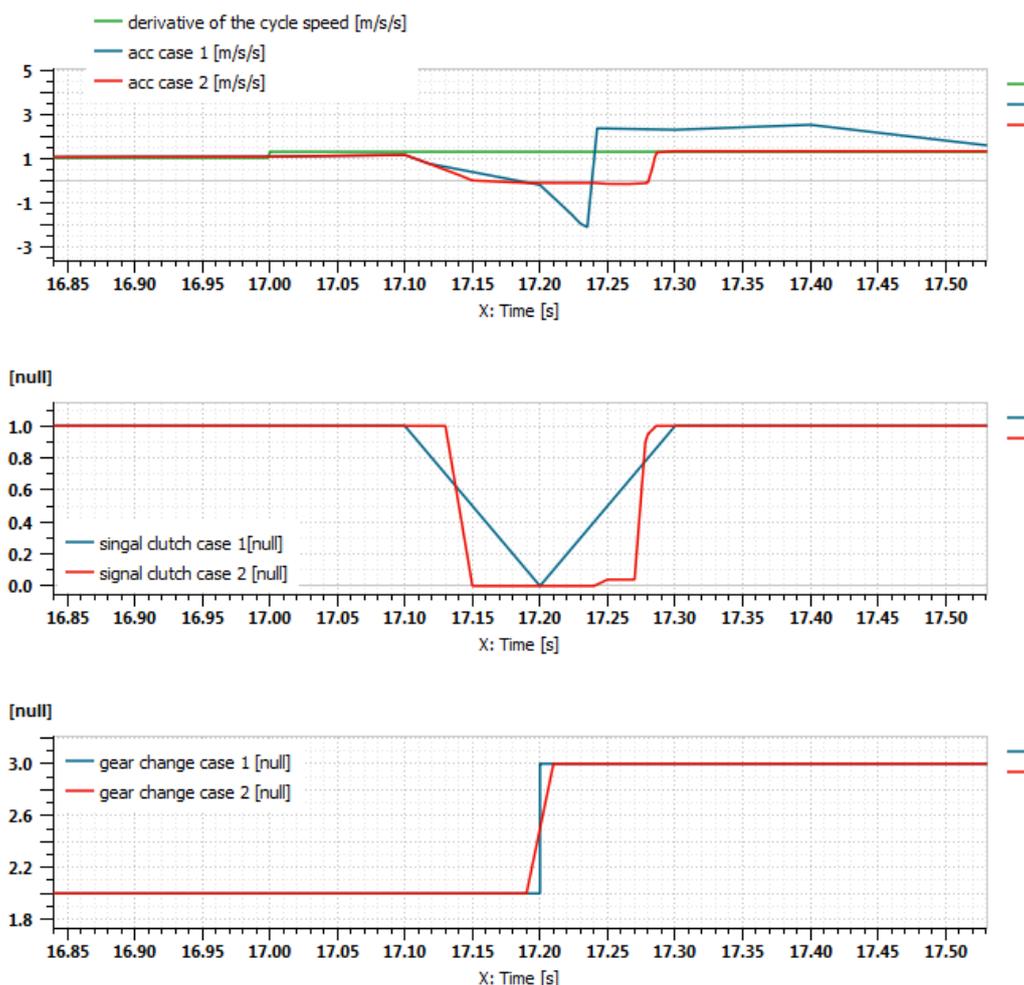


Fig. 4.47: La prima figura mostra l'andamento dell'accelerazione e confronto dei due casi, la seconda figura mostra il segnale di apertura della frizione comparato con il caso precedente, la terza figura invece il segnale di cambio marcia.

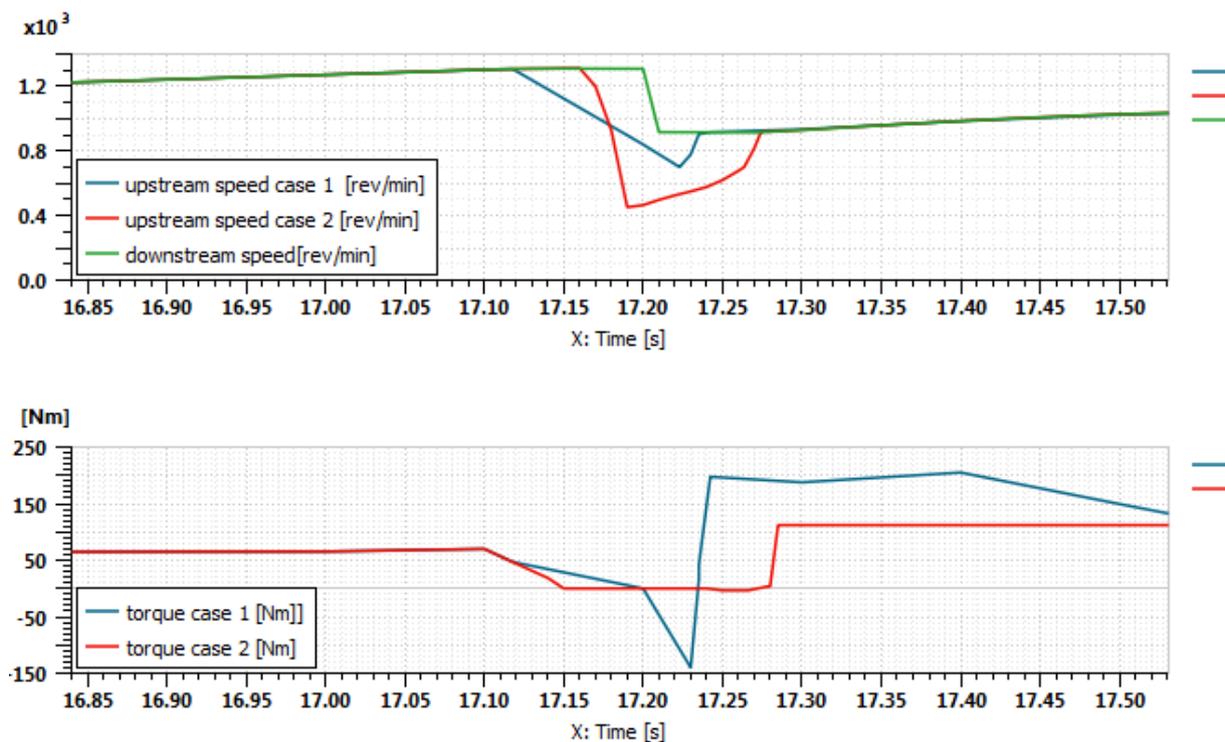


Fig. 4.48: La prima figura descrive andamento della velocità, seconda figura andamento della coppia.

Il grafico in alto in Fig.4.48 riporta l'andamento delle velocità a monte e valle della frizione durante la fase del cambio di marcia. La curva in rosso rappresenta il secondo caso di apertura della frizione. Avere un segnale più lento e squadrato porta ad effettuare l'operazione del cambio marcia più lentamente. Per evitare le discontinuità si è fatto in modo di effettuare la chiusura della frizione subito dopo che le due velocità a monte e valle del cambio di marcia siano divenute uguali. Se la frizione viene ancora lasciata aperta o è in fase di chiusura si assiste ad un andamento oscillatorio della velocità di monte che provoca la formazione di ulteriori picchi. Infine possiamo dichiarare che il cambio di marcia e l'azionamento della frizione avviene in una fase temporale pari a 0.18 s.

5 CAPITOLO: VEICOLO IBRIDO ELETTRICO SERIE PARELLEO EVT 1 MODE

In questo capitolo è stato riportato ed analizzato il modello di veicolo ibrido serie parallelo con EVT 1 mode schematizzato in Fig.5.1 . La configurazione powertrain a volte indicato come ibrido parallelo serie utilizzata in alcune vetture Toyota, Lexus e Ford, combina le due configurazioni precedenti con un dispositivo input split-power. È interessante perché con una corretta strategia di controllo può essere progettato per sfruttare sia il tipo parallelo che quello serie cercando di valorizzare i loro vantaggi.

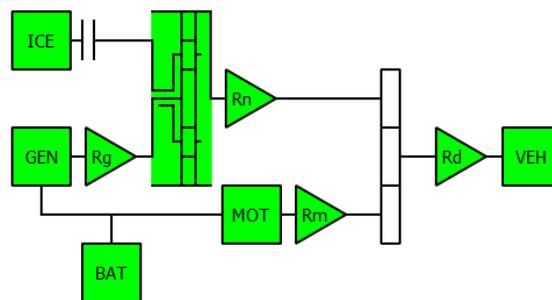


Fig. 5.1: Architettura veicolo ibrido serie-parallelo EVT 1 mode.

Per questo tipo di architettura sono state eseguite analisi mediante il tool HOT, abbondantemente descritto nelle precedenti architetture, ma si è scelto di non riportare i dati e dare maggiore attenzione al funzionamento EVT e flussi di potenza visibile attraverso un modello complesso creato mediante l'assemblaggio dei vari organi e sottomodelli disponibili nelle apposite librerie, riportato in Fig.5.2.

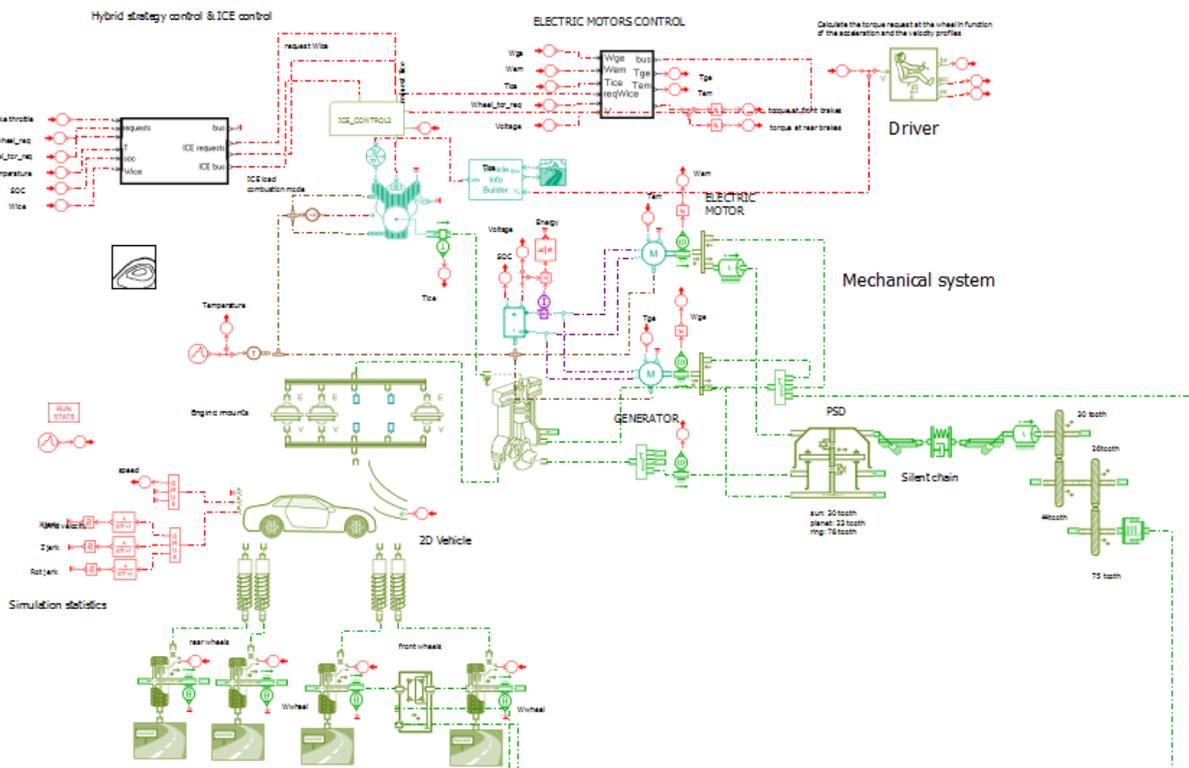


Fig. 5.2: Modello EVT 1 mode implementato.

In questo caso sono state utilizzate delle centraline apposite per ICE e per le macchine elettriche prese dalla libreria demo e utilizzate esclusivamente per questo tipo di configurazione. L'obiettivo resta sempre quello di fornire le coppie da applicare ai diversi propulsori al fine di ottimizzare il consumo di combustibile ed salvaguardare la vita utile della batteria. La centralina riguardante ICE chiede in ingresso stato di carica, velocità ICE, coppia richiesta alle ruote, di accelerazione e frenata e da in uscita coppia da fornire e la modalità di accensione che a loro volta sono un ingresso per la ECU (Engine Control Unit) e per la centralina delle macchine elettriche. Infatti quest'ultima ha in ingresso anche le velocità delle due macchine, il voltaggio e anche la velocità delle ruote. Restituisce la coppia da fornire alle due macchine elettriche e la coppia dell'impianto frenante.

In questo modello è stato inserito anche un sistema di supporto del motore termico ed anche le sospensioni per effettuare un'analisi ancor più veritiera

Il veicolo è composto da un motore termico ICE che presenta le seguenti caratteristiche:

Coppia massima:	157.5 [Nm] a 3750 [rpm]
Potenza massima:	118.91 [Cv] a 6000 [rpm]
Cilindrata:	1.6 [l]
Numero di cilindri:	4
Numero di valvole per cilindro:	4
Densità del combustibile:	750 [kg/m ³]
Potere calorifico inferiore combustibile:	42000 [kJ/kg]
Tipo ciclo motore:	Ciclo Atkinson
Velocità idle:	700 [rpm]

Nella caratteristica in Fig.5.3 è riportata l'andamento della rispettiva Economic line, necessaria nella implementazione della centralina. La centralina richiede necessariamente le condizioni per l'avvio e spegnimento forzato del motore termico; stato di carica maggiore al 80 [%] è preferibile spegnere il motore termico e funzionare il puro elettrico, e al 40 [%] è necessario accendere il motore per rigenerare la batteria. Altre condizioni che portano il motore termico ad accendere è il superamento dei 180 [kW] di potenza richiesta alle ruote.

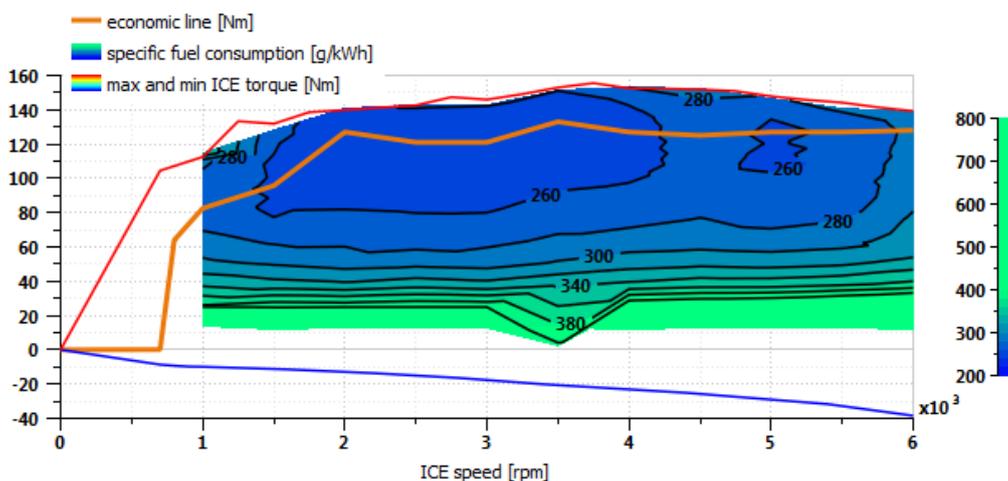


Fig. 5.3: Caratteristica di coppia e consumo specifico ICE.

L'organo indicato come GEN generatore in realtà si comporta come un motore vero e proprio per cui verrà indicato con la sigla EM 2. È stato scelto un motore elettrico a magneti permanenti che presenta le seguenti caratteristiche:

Coppia massima continuativa: 120 [Nm]
 Coppia massima 135 [Nm]
 Potenza massima continuativa: 57 [Cv] a 3350 [rpm]

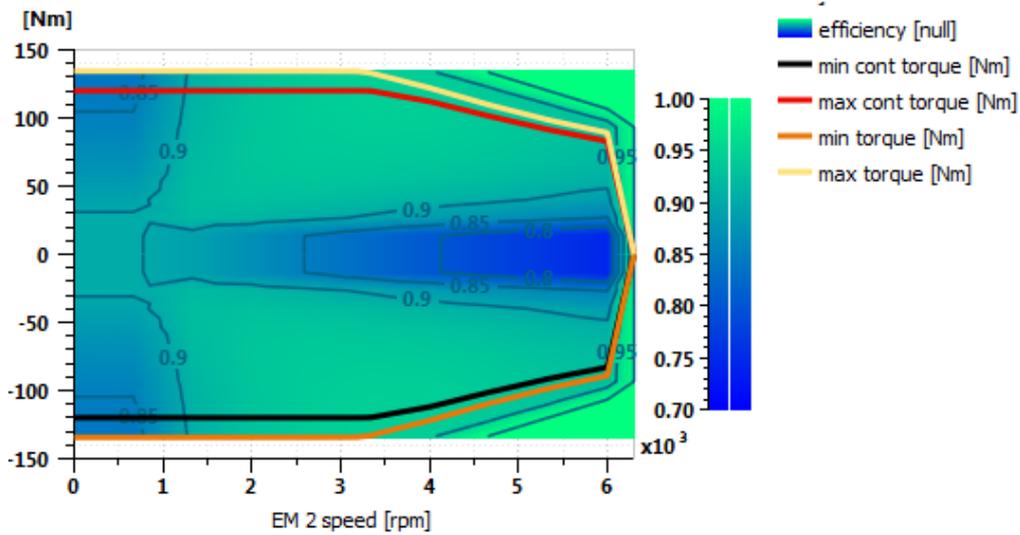


Fig. 5.4: Caratteristica di coppia e rendimento EM2.

Il motore elettrico EM1 ha delle prestazioni maggiori presenta coppia e potenza più alte rispetto al motore EM 2, sempre a magneti permanenti, presenta le seguenti caratteristiche:

Coppia massima continuativa: 163 [Nm]
 Coppia massima 330 [Nm]
 Potenza massima continuativa: 70 [Cv] a 3000 [rpm]

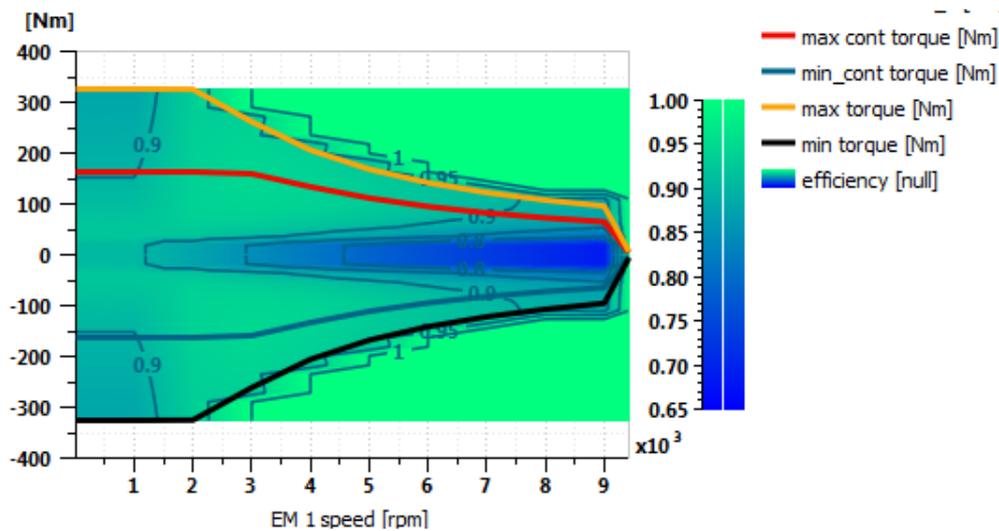


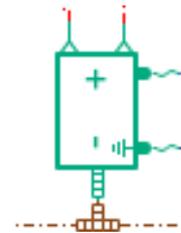
Fig. 5.5: Caratteristica di coppia e rendimento EM1.

Dalle caratteristiche di coppia e potenza possiamo calcolare il fattore di ibridizzazione del veicolo:

$$f_{\text{fattore di ibridizzazione}} = \frac{\text{Potenza Elettrica}}{\text{Potenza totale bordo veicolo}} = 51.4 \%$$

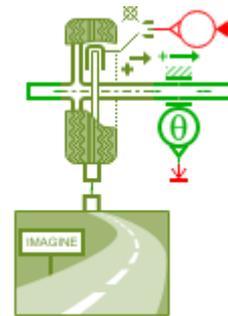
Per quanto riguarda la batteria è stata utilizzata una batteria a ioni di litio pari avente le seguenti caratteristiche:

n° di elementi in serie in un branch:	40
n° di branches in serie	6
n° di branches in parallelo:	1
Capacità della batteria:	6.5 [Ah]
Range accettabile di SOC (state of charge):	80-20 [%]
SOC iniziale (variabile):	65 [%]
Tensione batteria:	310[V]



Infine possiamo definire tutte le caratteristiche del veicolo che poi andranno a definire le forze di resistenza al moto:

Sezione frontale veicolo:	2 [m ²]
Coefficiente aerodinamica Cx:	0.3 [-]
Coefficiente di attrito f:	0.01 [-]
Larghezza pneumatico:	170 [mm]
Altezza pneumatico:	65 [%]
Diametro cerchio:	15 [in]
Inerzia ruota:	0.75 [kg m ²]
Massa totale veicolo:	1650 [kg]



Per quanto riguarda la trasmissione esso sarà dotato di un dispositivo denominato Power Split Device che è sostanzialmente un rotismo epicicloidale che da la possibilità di evitare l'utilizzo di una trasmissione complicata e la frizione e da la possibilità di effettuare una trasmissione elettrica variabile definita EVT come definita in Fig.5.6 .

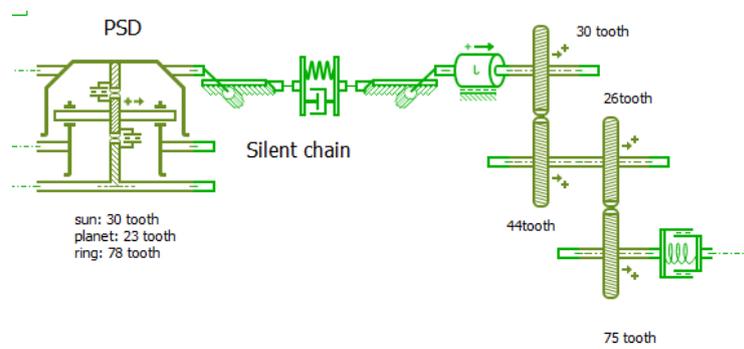


Fig. 5.6: Schema rappresentativo del PSD, silent chain e riduttore di velocità finale.

Il sistema presenta un rapporto di trasmissione definito dalla geometria del rotismo, sarà anche chiamato rapporto di trasmissione di coppia:

$$\tau_{EVT} = \frac{T_{ice}}{T_{out}} = \frac{N_S + N_R}{N_R} = 1.38 \quad \frac{1}{\tau_{EVT}} = 0.7246$$

- τ_{EVT} rapporto trasmissione EVT;
- N_S numero denti sun;
- N_R numero denti ring;
- T_{ice} coppia ICE;
- T_{out} coppia out EVT.

Il rapporto della velocità motore su velocità di uscita del rotismo è invece variabile e dipende dalla velocità del generatore, che effettua il controllo sul motore termico, ed è definito dalla legge :

$$\frac{\omega_{ICE}}{\omega_{OUT}} = \frac{1}{\tau_{EVT}} + \left(1 - \frac{1}{\tau_{EVT}}\right) \frac{\omega_{GEN}}{\omega_{OUT}}$$

- w_{ice} velocità ICE (carrier);
- w_{gen} velocità GEN (sun);
- w_{out} velocità out EVT (ring);

Infine il resto della trasmissione può essere definito mediante un rapporto di trasmissione finale dato dal rapporto della velocità alle ruote sulla velocità all'uscita del EVT.

$$\tau_f = \frac{w_R}{w_{OUT}} = 4.35$$

- w_r velocità ruote;
- τ_f rapporto trasmissione finale.

Tra le diverse analisi effettuate si è scelto di riportare alcune che riguardano richieste specifiche da fornire al driver con l'obiettivo di verificare come si comportano i vari componenti:

- Accelerazione fino alla velocità di 200 [km/h] con SOC pari al 65[%];
- Accelerazione fino alla velocità di 200 [km/h] con SOC pari al 90[%];
- Accelerazione repentina da 50 [km/h] alla velocità di 90 [km/h], manovra sorpasso di emergenza su strada suburbana;
- Analisi su ciclo NEDC tratto extraurbano, con stato di carica pari al 65[%] e 40 [%];
- Analisi su ciclo NEDC tratto urbano, con stato di carica pari al 65[%] e 40[%];
- Analisi consumo di carburante su ciclo WLTC e WLTC ridotto.

5.1 Analisi accelerazione continua e costante fino alla velocità di 200 [km/h] e permanenza partendo da uno stato di carica del 65 [%]

La prima analisi è stata effettuata chiedendo al driver una manovra di accelerazione costante fino alla velocità di 200 [km/h] (Fig.5.7) partendo da uno stato di carica della batteria pari al 65 [%], per analizzare il comportamento delle velocità e coppia del PSD e i flussi di potenza.

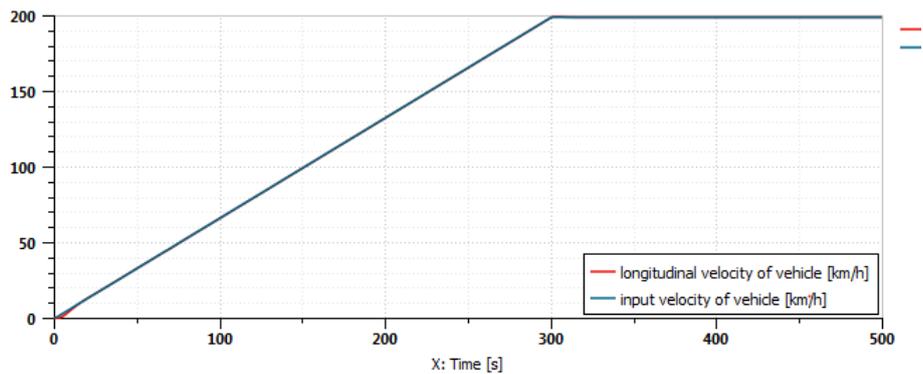


Fig. 5.7: Analisi inseguimento velocità di riferimento veicolo.

Nella Fig.5.8 è riportato l'andamento delle velocità del carrier (ICE) del sun (EM2) e dell'uscita del rotismo che coincide con la velocità del motore EM1.

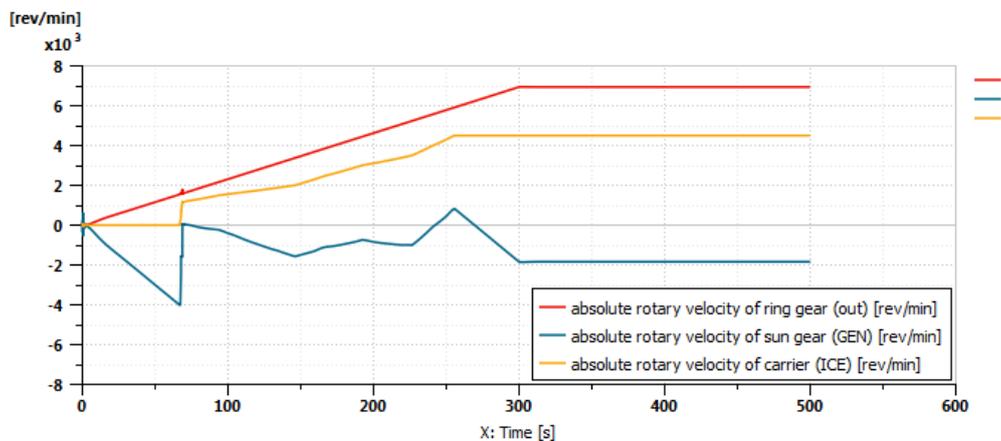
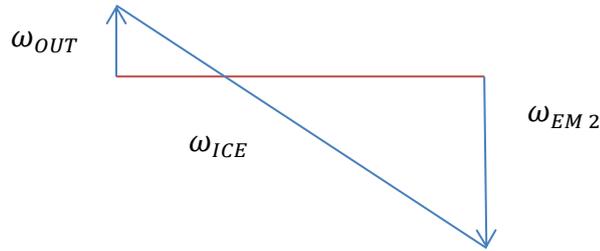


Fig. 5.8: Andamento delle velocità nel PSD.

Per spiegare le fasi del principali di funzionamento del veicolo ci atteniamo alla analogia della leva sulla coppia e velocità. L'analogia della leva sulla coppia è banale e mostra solamente la relazione tra le coppie del rotismo dettate esclusivamente dalla geometria dello stesso e in particolare dal numero di denti. Di maggiore importanza è l'analisi sulla velocità:

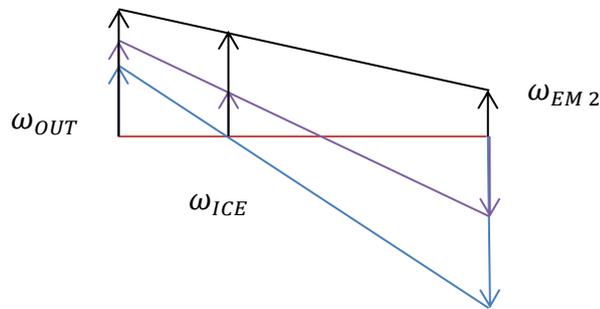
1) Avviamento veicolo:

Velocità ICE nulla e l'avviamento del veicolo avviene attraverso il EM 2 e il motore elettrico EM 1, tratto iniziale circa 70 secondi della simulazione, la propulsione avviene in puro elettrico, l'equilibrio tra la velocità delle due macchine elettriche rende nulla la velocità del motore termico.



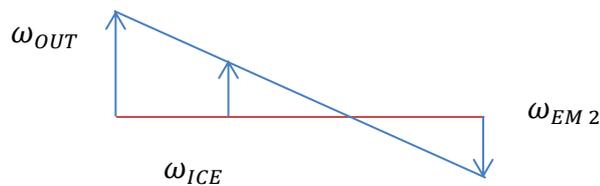
2) Avviamento termico:

Nel transitorio dell'avviamento ICE, la velocità in uscita varia di poco, la velocità del EM 2 si inverte, diventa positiva e il motore termico si avvia. In figura è rappresentato un transitorio di avviamento ICE da velocità nulla (azzurro) ad un punto di velocità a circa 1500 rpm.



3) Funzionamento transitorio di accelerazione ICE:

Tratto temporale 80-220 secondi la velocità del generatore è negativa secondo la convenzione e man mano la velocità del ICE aumenta in corrispondenza dell'aumento anche della velocità di uscita e del EM 1. In basso è riportato un esempio.



4) Mantenimento della velocità ICE costante e aumento velocità veicolo:

ICE, per raggiungere la velocità di 4500 [rpm] viene accelerato fino al secondo 240, in seguito la velocità ICE resta costante e la velocità di EM2 diviene negativa per ottenere un incremento di velocità all'uscita.

Valutiamo il valore del rapporto tra la velocità del motore termico sulla velocità alle ruote del veicolo.

$$\frac{\omega_{ICE}}{\omega_R} = \frac{\tau_f}{\tau_{EVT}} + \left(1 - \frac{1}{\tau_{EVT}}\right) \frac{\omega_{EM2}}{\omega_R}$$

Il rapporto risulterebbe essere circa costante nel tempo e in relazione alla velocità ICE (Fig.5.9) quindi si potrebbe cercare di ricostruire la relazione tra le due velocità in modo da imporre al EVT a priori e stabilire quali velocità bisogna fornire ad esempio al EM2 per regolare il motore termico ICE.

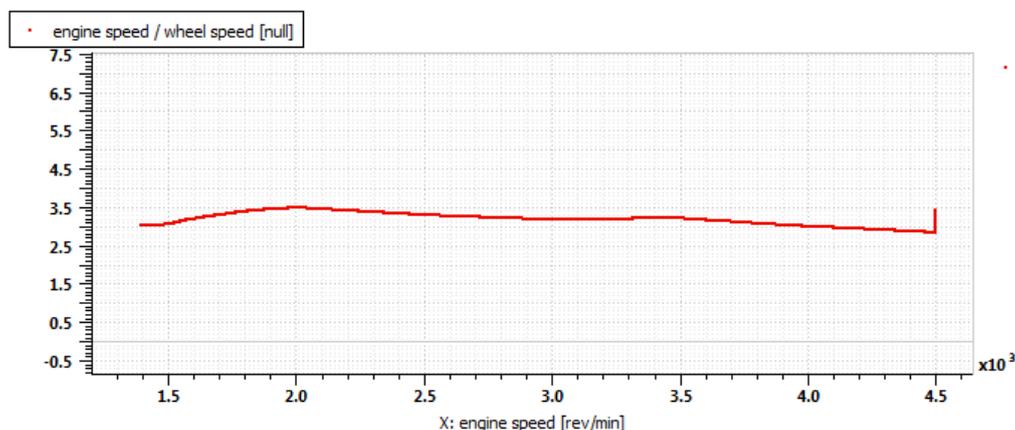


Fig. 5.9: Andamento del rapporto velocità motore e velocità ruote in funzione della velocità motore.

Le configurazioni power-split hanno percorsi completamente meccanici ed elettromeccanici che combinano l'ingranaggio planetario e due macchine elettriche, come mostrato nella Fig.5.10.

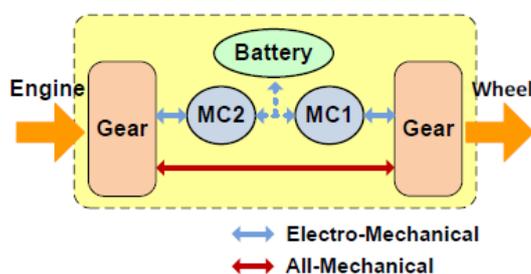


Fig. 5.10: Schema rappresentativo dei differenti percorsi energetici.

In un percorso interamente meccanico, la potenza del motore a combustione interna (ICE) viene trasmesso direttamente alle ruote. Nell'altro percorso (il percorso elettromeccanico), la potenza del motore viene convertita in elettricità da un motogeneratore EM2 per azionare il motogeneratore elettrico EM1 o per caricare la batteria, come vedremo dalle simulazioni ci saranno condizioni in cui EM1 converte potenza meccanica ICE in potenza elettrica. Il circuito chiuso dipende dal rapporto di velocità, e talvolta la potenza circolata aumenta di molto, pertanto, le macchine elettriche sono notevolmente sovradimensionate per soddisfare i requisiti. Questa circolazione di potenza può portare a perdite elevate e quindi a una bassa efficienza della trasmissione di potenza.

Per poter stabilire il miglior compromesso tra i due percorsi si determina il miglior rapporto tra la velocità del motore termico e velocità in uscita dal Power Split Device, da utilizzare per poter massimizzare il rendimento. Per effettuare questo calcolo dobbiamo suddividere le potenze in gioco per i rispettivi due percorsi, per cui si parlerà di potenza meccanica e potenza elettromeccanica. Per individuare lo split di potenza si è deciso di lavorare a livello del Power Split Device definendo un volume di controllo (Fig.5.11), per cui calcoliamo il parametro Power Ratio come rapporto tra potenza elettromeccanica (quota di potenza ICE che passa per

il EM 2, batteria e EM 1) e potenza totale ICE, ottenendo un parametro che ci indica la quantità di potenza del ICE che viene convertita dal EM 2 e che segue dunque il percorso elettromeccanico rispetto alla totale potenza totale fornita dal ICE. Quindi più il Power Ratio (PR) sarà alto più stiamo utilizzando il percorso elettromeccanico da parte del motore EM 2.

$$Power\ Ratio = \frac{Electro\ Mechanical\ Power}{Power_{ICE}} = \frac{P_{EM\ 2} \cdot \eta_{EM\ 2} \cdot \eta_{BAT} \cdot \eta_{EM\ 1}}{P_{ICE}}$$

Questa configurazione input-split è composta da due ingranaggi planetari e due macchine elettriche (EM1 e EM2). La macchina elettrica più grande sulla destra (EM1) è collegata all'albero di uscita e non influisce sul rapporto di velocità. Pertanto, per questa particolare disposizione EVT, che massimizza la coppia di uscita, la velocità dell'uscita è la media ponderata della velocità dell'ingresso e la velocità di EM2. Nel calcolo non si considera la trasmissione a valle del PSD in quanto comune ai due percorsi.

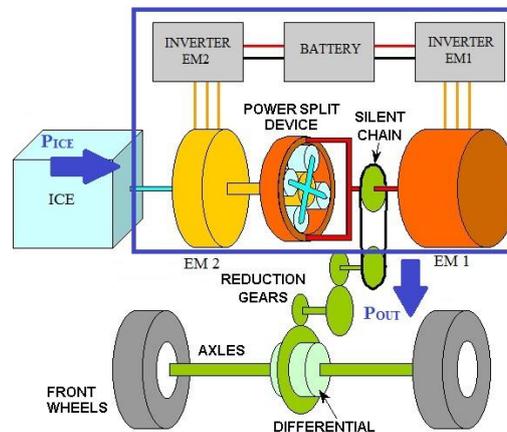


Fig. 5.11: Schema EVT con sistema di controllo utilizzato per il calcolo di PR.

Il Power Ratio, calcolato in precedenza viene messo in relazione con Speed Ratio il rapporto tra la velocità del motore termico, velocità ingresso, rispetto alla velocità di uscita del rotismo, velocità del ring.

$$Speed\ Ratio = \frac{\omega_{ice}}{\omega_{out}}$$

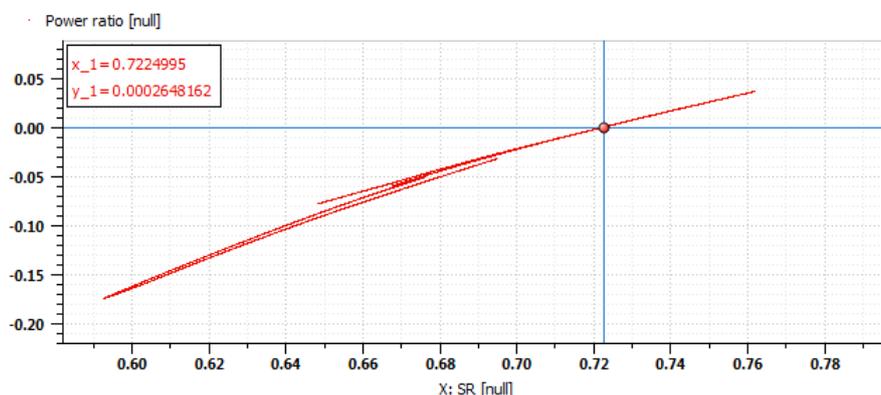


Fig. 5.12: Andamento PR in funzione di SR, con punto meccanico.

Il valore del PR è positivo quando si sta utilizzando il percorso elettromeccanico e la quantità indica il peso di potenza lungo questo percorso. Quando il PR è pari a 0 il PSD lavora solo sul lato meccanico per cui nessuna percentuale della potenza del ICE segue il percorso elettromeccanico, questo punto viene chiamato Mechanical Point. Infine se negativo la potenza circola lungo il percorso chiuso.

Da notare in Fig.5.13 nel Mechanical Point si ha che $PR=0$ e $SR=0.72$, in corrispondenza della velocità del EM 2 nulla, il rapporto tra le velocità ICE e uscita è pari al rapporto geometrico, rapporto di trasmissione tra le coppie.

$$SR_{MP} = \frac{1}{\tau_{EVT}} = \frac{N_R}{N_R + N_S}$$

Per capire quale è il miglior rapporto tra la velocità ICE e quella in uscita dal PSD in cui si desidera lavorare, bisogna analizzare l'efficienza del sistema. Consideriamo un volume di controllo, considerando la batteria al di fuori di esso, per cui dovremmo tenere in considerazione anche i flussi di potenza in entrata ed in uscita da essa.

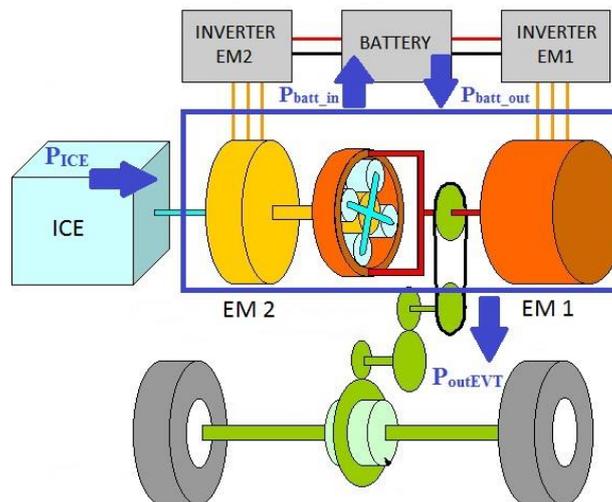


Fig. 5.13: Schema EVT con sistema di controllo utilizzato per il calcolo di η_{EVT} .

L'efficienza totale è ottenuta considerando la potenza ICE e la potenza positiva della batteria come ingresso del volume di controllo e come uscita la potenza out, calcolata rilevando i valori di coppia e velocità in prossimità del silent chain, in modo da rispettare il volume di controllo scelto e la potenza negativa della batteria, dovuta alla rigenerazione mediante il motore EM 1. P_{batt_in}

$$\eta_{EVT} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out\ EVT} + P_{batt\ in}}{P_{ICE} + P_{batt\ out}} \quad \begin{cases} P_{batt\ out} = P_{batt} & \text{se } P_{batt} \geq 0 \\ P_{batt\ in} = P_{batt} & \text{se } P_{batt} \leq 0 \end{cases}$$

Tale efficienza è ritenuta accettabile in condizioni stazionarie o in una serie di successive prove stazionarie, in quanto trascuriamo la quota dovuta all'accumulo di energia cinetica sui componenti meccanici.

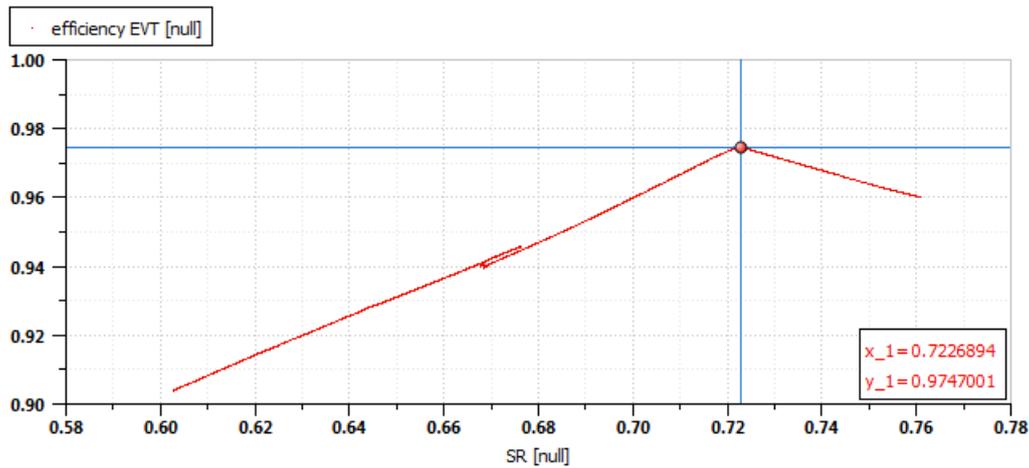


Fig. 5.14: Andamento efficienza EVT in funzione di SR.

Nella Fig.5.14 è rappresentata l'efficienza del EVT 1 mode in funzione del rapporto SR. Si nota dunque che per il Mechanical Point corrispondente in Fig.5.12 si ha la migliore efficienza, quindi è il rapporto migliore tra le velocità per poter far lavorare il sistema. A destra e sinistra di questo punto l'efficienza diminuisce. Si accetta di far lavorare il sistema lungo una certa variazione del SR in modo da accettare punti di funzionamento ad alta efficienza.

Lo schema riporta anche la limitazione dell'architettura EVT 1 mode, ovvero un abbassamento della efficienza man mano che lo Speed Ratio diminuisce, quindi in corrispondenza delle alte velocità del veicolo. Questo è dovuto essenzialmente alla efficienza delle macchine elettriche che tende a diminuire nella zona ad alto numero di giri e bassa coppia. Per cui per poter ottimizzare ulteriormente il sistema si potrebbe utilizzare un EVT multi mode che permette di selezionare differenti modalità in modo da avere almeno 2 punti di Mechanical Point e consentire al sistema di lavorare sull'involuppo delle curve, nel nostro caso sarebbe ottimo andare ad inserire una modalità EVT che permetta di andare a lavorare in un rendimento maggiore anche con valori di SR più bassi.

Riportiamo anche gli andamenti delle potenze del ICE, EM 2 e EM 1. La potenza del motore termico è crescente nel tempo, dal momento che si avvia fino all'istante in cui ha raggiunto la velocità di 4500 [rpm], dopodiché la potenza resta costante nel tempo.

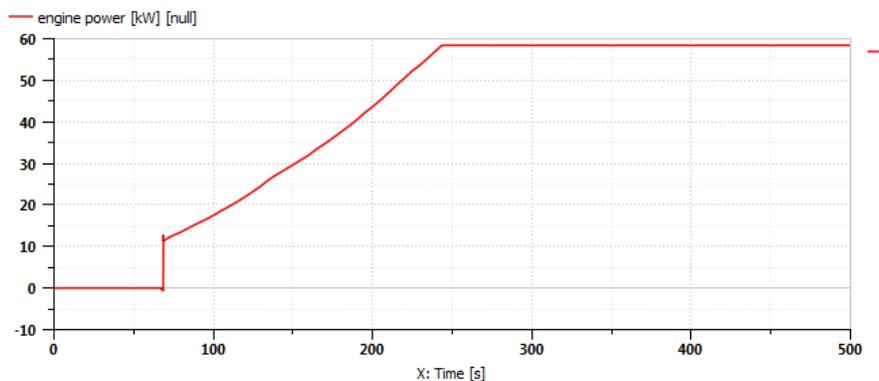


Fig. 5.15: Andamento potenza ICE.

La potenza del motore EM 2 in Fig.5.16 ci fa capire che in realtà tale macchina non può essere considerata come generatore, ma si comporta come motore dato che fornisce potenza

positiva nella fase in cui ICE deve accelerare e nella fase in cui la potenza del ICE deve essere mantenuta costante. L'andamento della coppia del EM 2 rimane sempre negativa nel tempo. Nella fase iniziale la propulsione avviene solo per mezzo del motore EM 1. Si può dedurre che EVT permette attraverso il controllo della velocità del motore elettrico EM 2 stabilire la potenza da distribuire ai vari organi della trazione.

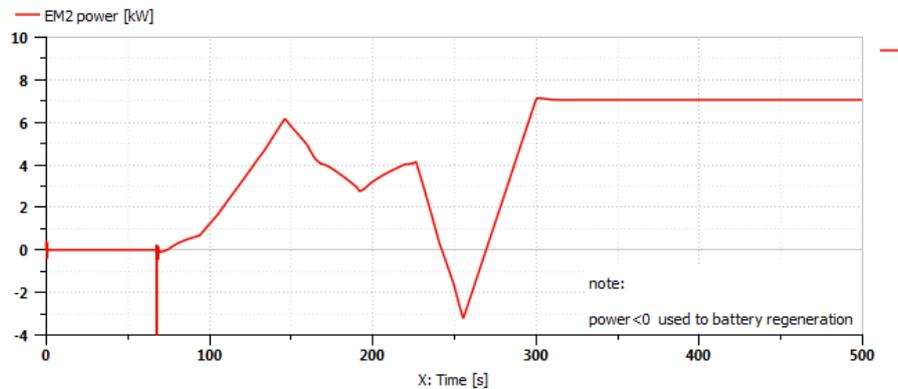


Fig. 5.16: Andamento potenza EM 2.

Dall'andamento della potenza del motore EM 1 si nota che è responsabile della trazione puramente elettrica del veicolo nella fase iniziale e che produce buster di coppia al power train. Nei periodi di variazione della velocità ICE come si evince al 240 secondo, in cui aumenta la pendenza il motore EM 1 fornisce potenza positiva. Il motore EM 2 invece in questo secondo sta fungendo da generatore alimentando la batteria dato che essa si sta scaricando in vista dell'utilizzo di EM 1. Nella fase a velocità costante del veicolo il motore EM 1 ricicla potenza mentre EM 2 fornisce potenza positiva al power train. Da questo sistema di gestione dell'energia si evince che il motore riesce a generare minore energia elettrica di quanta ne serve per poter far funzionare EM 2 per cui la batteria si scarica (Fig. 5.19). La scarica della batteria è lenta perché deve fornire poca potenza dato che il resto viene rigenerato dal motore EM 1. La ricircolo di potenza mediante il motore EM 1 viene evidenziata nella Fig. 5.17, nei tratti in cui la potenza è negativa.

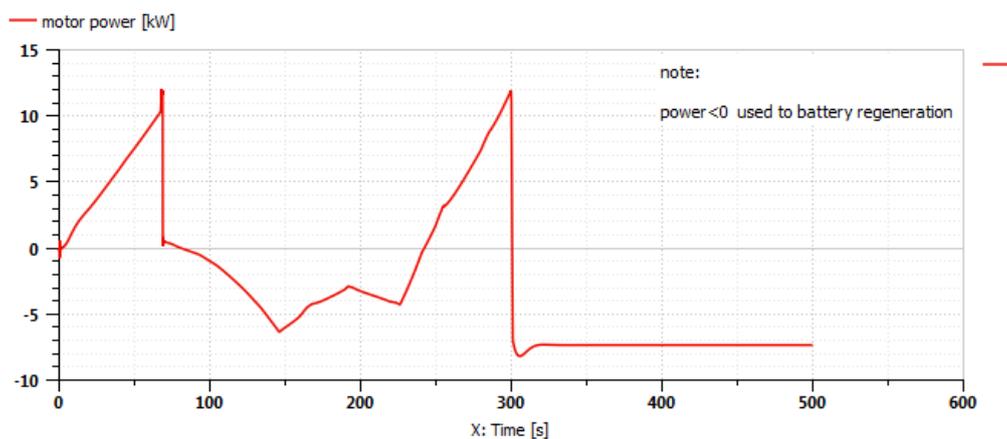


Fig. 5.17: Andamento potenza EM 1.

La Fig. 5.18 riporta l'andamento della potenza della batteria. Si nota che nonostante il ricircolo della potenza da parte di EM 1, negli istanti temporali da circa 80 a 260 secondi e 300 fino a 500 secondi, la batteria fornisce sempre potenza positiva. La potenza rigenerata da EM1

alimenta direttamente il motore EM2, questo permette di ridurre la quantità di potenza che la batteria dovrà fornire. Per individuare la quota ricircolata da EM1 si potrebbe calcolare un PR considerando la potenza EM1.

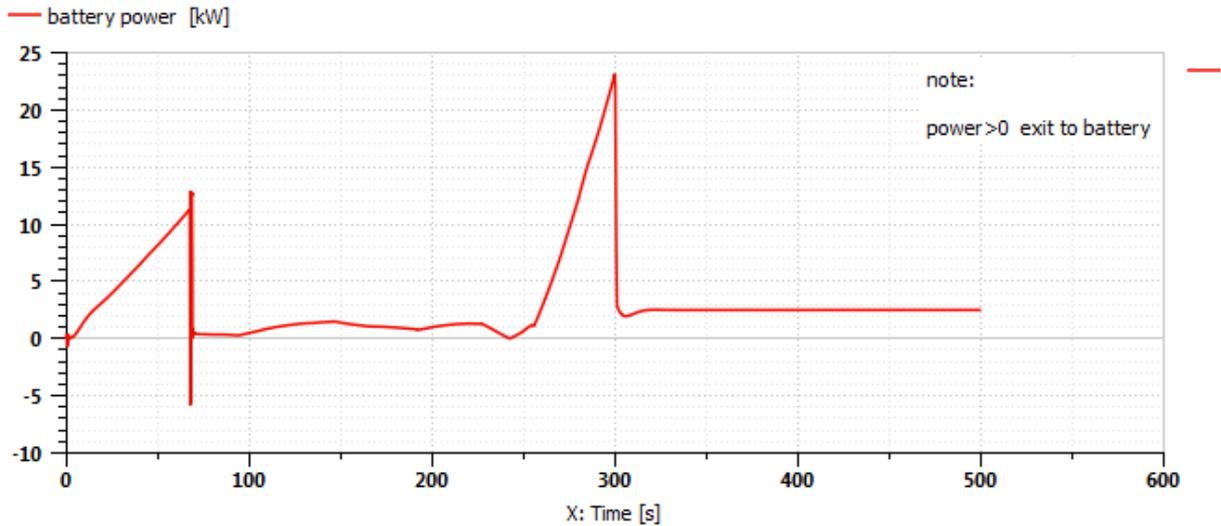


Fig. 5.18: Andamento potenza batteria.

Riportiamo ora l'andamento dello stato di carica della batteria. Si nota che l'andamento è decrescente, i motori elettrici vengono utilizzati nel migliore dei modi per cercare di mantenere basso il consumo di combustibile da parte del ICE. Lo stato di carica partendo da uno stato iniziale dal 65 % scende fino al 40 %. Il sistema di controllo interviene indicando al driver che dovrà limitare la sua velocità altrimenti rischierebbe di arrivare ad avere uno stato di carica al di sotto del dovuto. L'andamento presenta una variazione della sua pendenza in prossimità temporale dell'utilizzo del motore EM1. Nell'analisi successiva si vedrà l'intervento da parte del correttore di velocità per permettere di incrementare lo stato di carica se si scende al di sotto del 40 % per evitare una sottocarica intensa che potrebbe danneggiare la batteria.

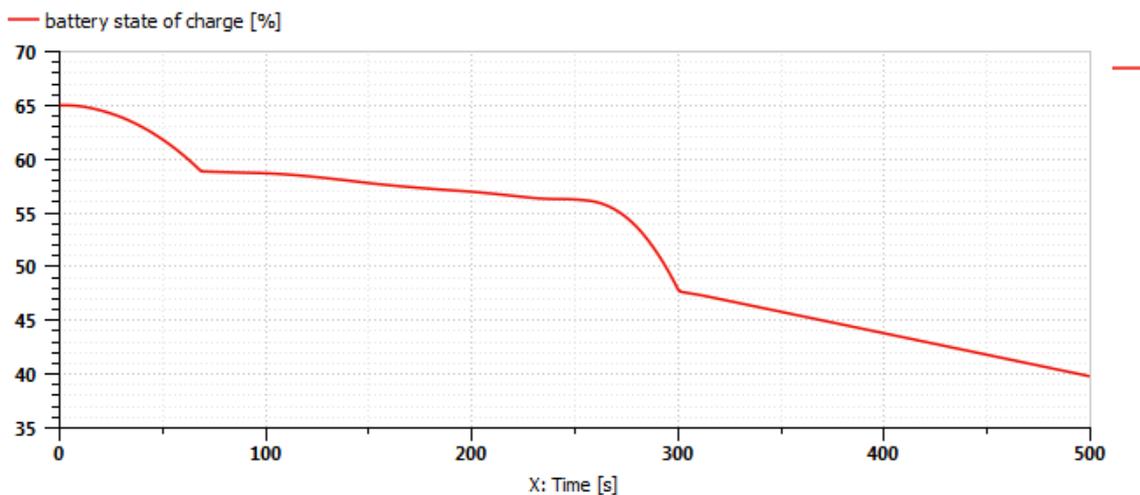


Fig. 5.19: Andamento stato di carica della batteria.

Riportiamo infine i punti di funzionamento del ICE, EM 2 ed EM 1 nelle rispettive Fig. 5.20, Fig.5.21 e Fig.5.22 . Dai grafici si evince come i punti di funzionamento ICE sono addensati vicino la E line ovvero nei punti di ottimo. I pallini mostrano la frequenza con in cui si persiste nel punto. La caratteristica del EM 2 è riportata sui 4 quadranti data la sua velocità negativa e coppia negativa lavora dunque come motore.

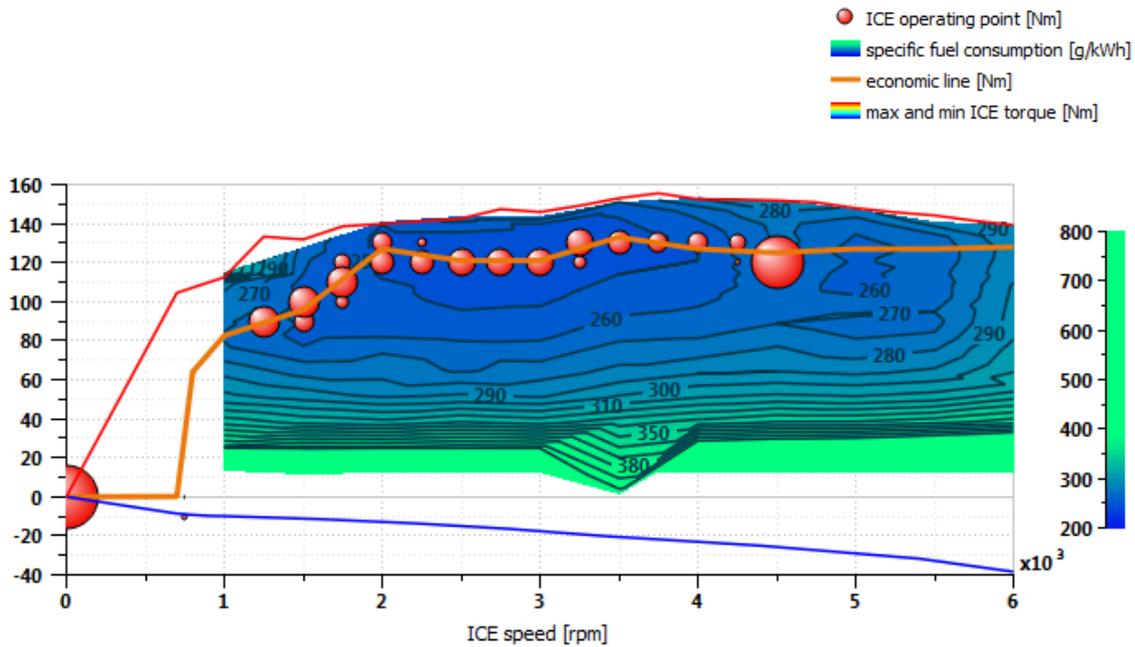


Fig. 5.20: Punti funzionamento ICE.

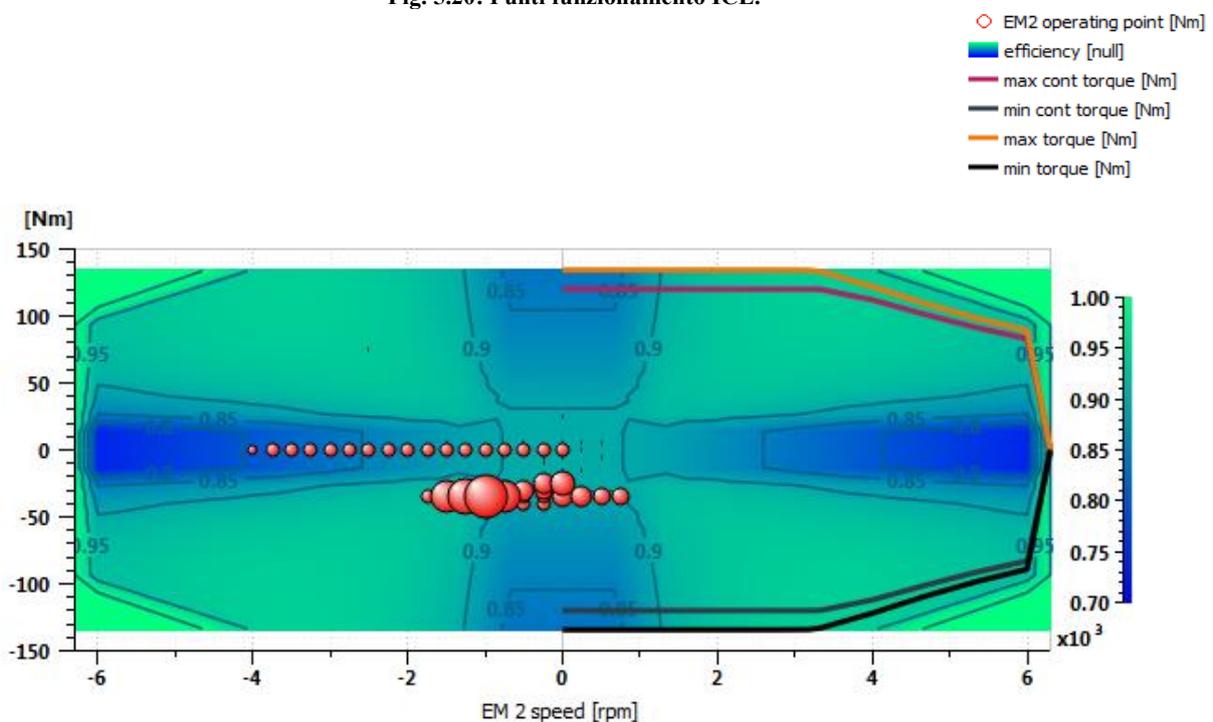


Fig. 5.21: Punti funzionamento EM 2.

I punti di funzionamento del EM 1 sono riportati nel primo quadrante, quindi funzionamento come coppia e poi nel secondo quadrante dove si assiste alla rigenerazione mediante ricircolo di potenza (anche se le coppie negative sono basse e non superano i -20 [Nm]). La grande

densità del pallino in corrispondenza della velocità a 7000 [rpm] e coppia negativa, testimonia il ricircolo di potenza verso la batteria.

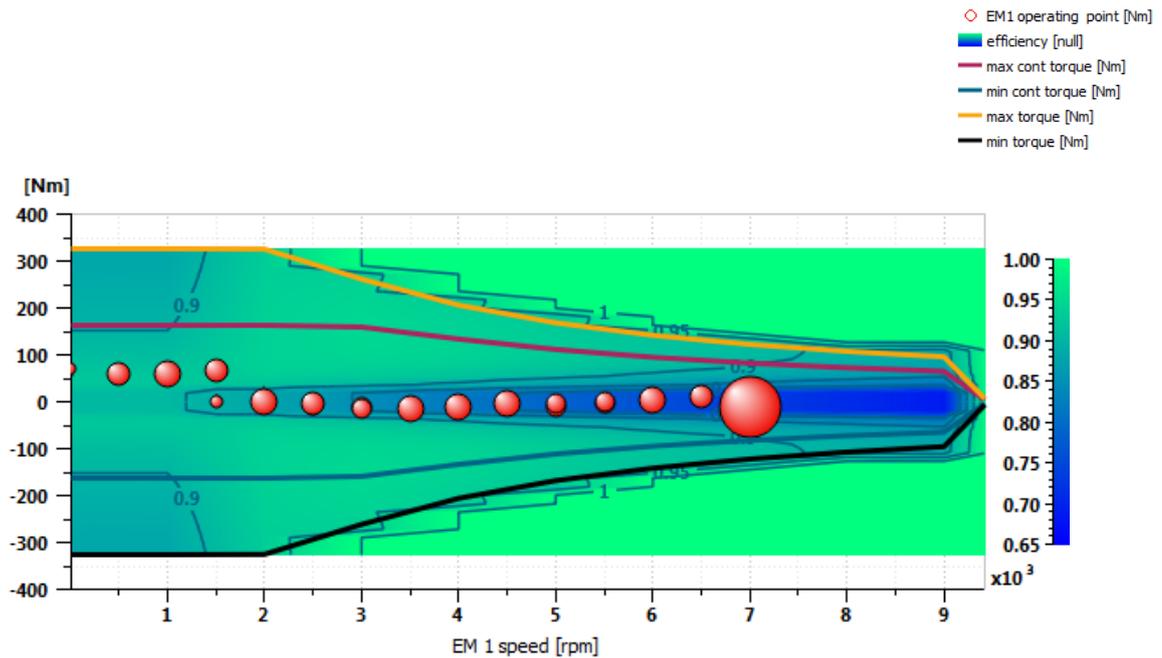


Fig. 5.22: Punti funzionamento EM 1.

5.2 Analisi accelerazione continua e costante fino alla velocità di 200 [km/h] e permanenza partendo da uno stato di carica del 90 [%]

In questa simulazione si è voluto effettuare un'analisi per capire quali sono i limiti effettivi del modello implementato per cui si richiede al driver di raggiungere una velocità di 200 [km/h] e di mantenerla partendo da uno stato di carica del 90 [%], di restare il più possibile a questa velocità finché si abbia uno stato di carica accettabile.

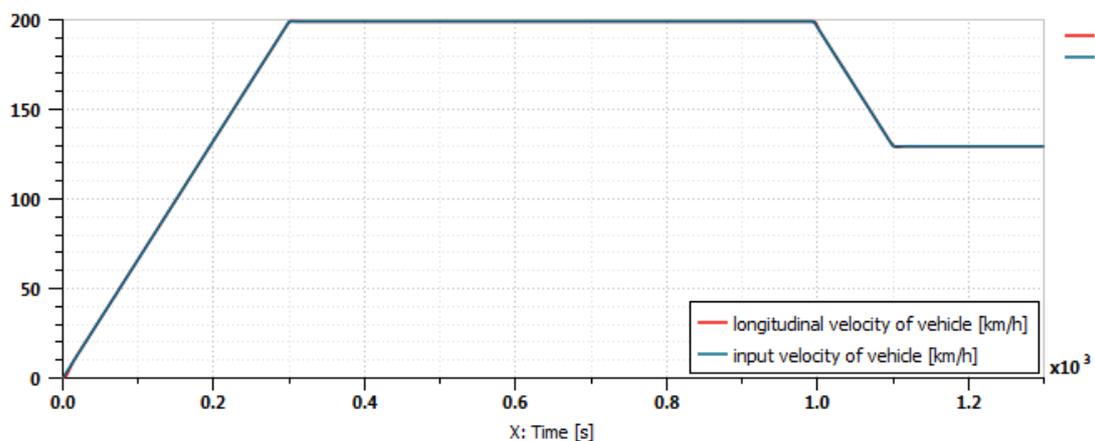


Fig. 5.23: Analisi inseguimento velocità di riferimento veicolo.

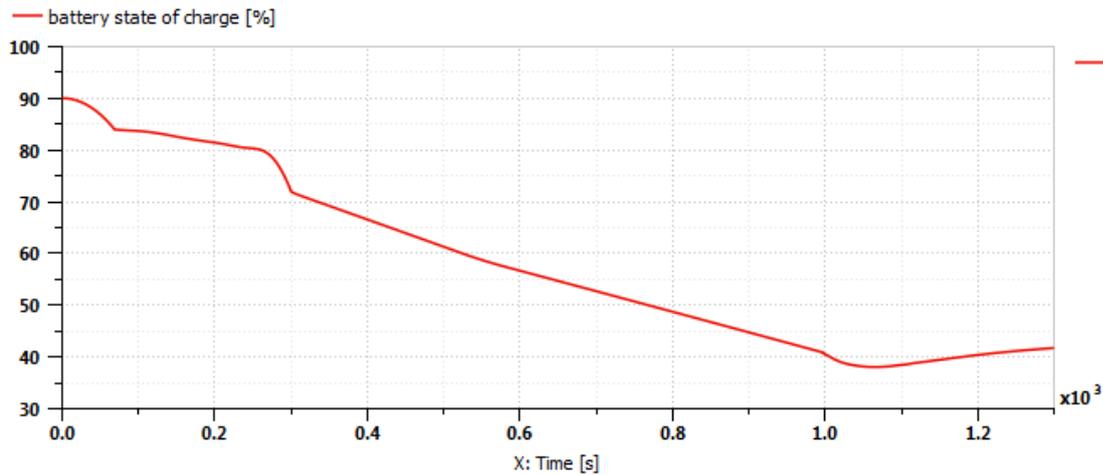


Fig. 5.24: Andamento dello stato di carica della batteria.

Dalla simulazione si evince che il veicolo mantiene la velocità di circa 200 [km/h] per circa 13.5 [min] raggiungendo un SOC pari al 40 [%] dopodiché si dovrà accettare una riduzione della velocità del veicolo, ad esempio 130 [km/h], per permettere alla batteria di rigenerarsi ed aumentare lo stato di carica come si evince in Fig.5.24.

5.3 Accelerazione repentina da 50 [km/h] alla velocità di 90 [km/h], manovra sorpasso di emergenza su strada suburbana.

La prossima simulazione riporta una manovra di accelerazione dalla velocità di 50 [km/h] alla velocità di 90 [km/h], ad esempio una manovra di sorpasso.

Nella simulazione si è considerato un livello di stato di carica pari al 65 [%] quando il veicolo è fermo. Si ha un primo tratto di accelerazione lenta fino al raggiungimento dei 50 [km/h] e poi un picco di accelerazione fino ai 90 [km/h]. Il veicolo non riesce a seguire la richiesta di accelerazione repentina per cui si avrà un distacco dall'inseguimento della velocità e quindi stiamo in una condizione critica.

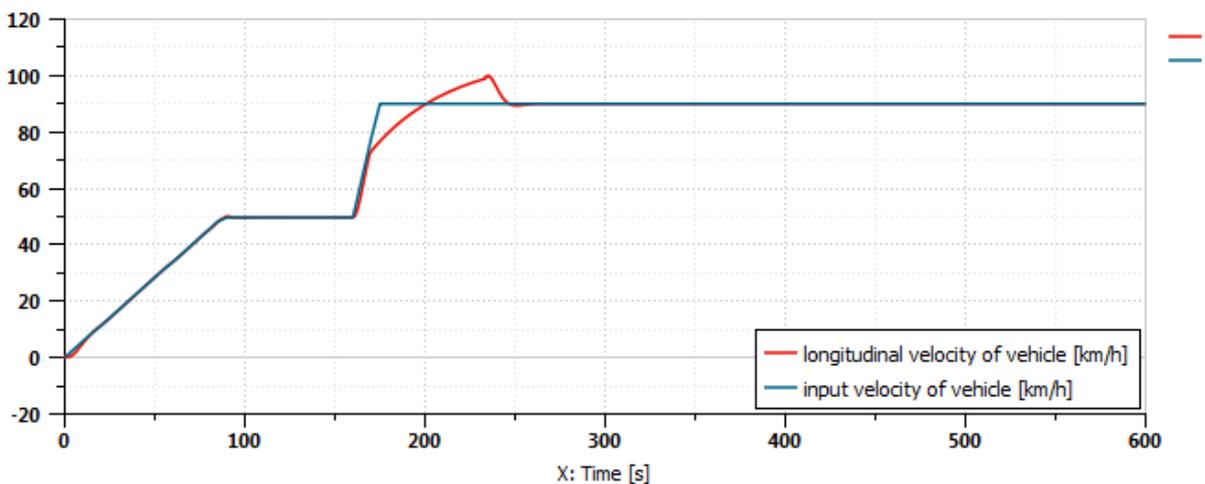


Fig. 5.25: Analisi inseguimento della velocità di riferimento veicolo.

In questa analisi si è potuto analizzare in particolare il comportamento del motore EM1. Nella simulazione precedente si era potuto già constatare il ruolo del EM1 ma in questo caso viene messo ancora più in evidenza il ruolo di buster di coppia. Esso fornisce una coppia e potenza istantanea a fronte di manovre rapide e richieste repentine da parte del driver. Dalla Fig.5.26 si mostra l'andamento della potenza del motore EM1 e come in corrispondenza della richiesta di accelerazione si ha una erogazione di potenza positiva che inizialmente assiste la potenza erogata dal ICE e man mano che il picco di accelerazione richiesta diviene a gradino e quindi di maggiore entità, maggiore sarà la potenza che potrà essere erogata dal EM1, considerando sempre il vincolo sulla potenza massima che può erogare la batteria. In questa fase interviene il motore EM2 che inverte la sua velocità e porta il motore ICE ad essere addirittura trascinato dal motore EM 1. Dopo che si raggiungono le condizioni per cui si ha il perfetto inseguimento della velocità il motore EM1 termina la sua funzione e inizia a lavorare come generatore per poter riportare lo stato di carica ad un livello accettabile.

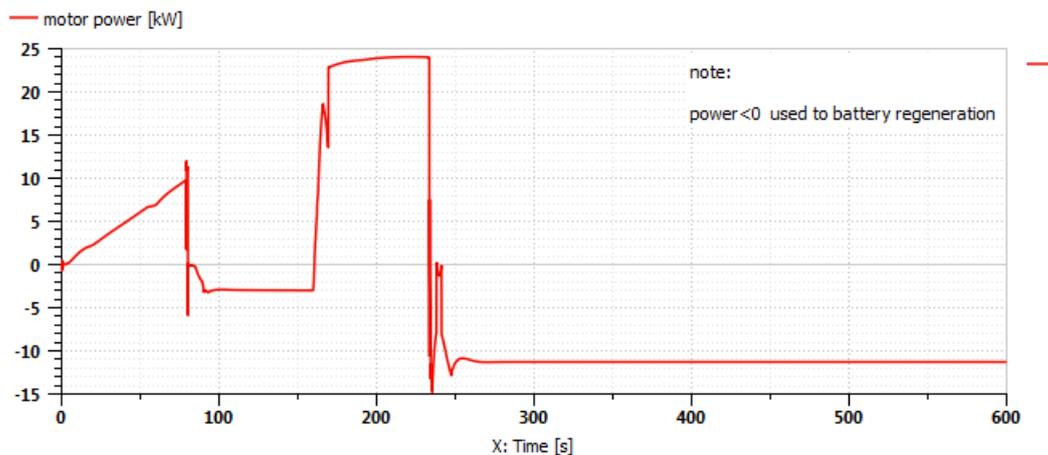


Fig. 5.26: Andamento potenza EM 1.

Durante questo funzionamento lo stato di carica è portato ad un minimo critico pari al 25 [%] per cui si deve necessariamente ricaricare la batteria come riporta l'andamento dello stato di carica in Fig.5.27.

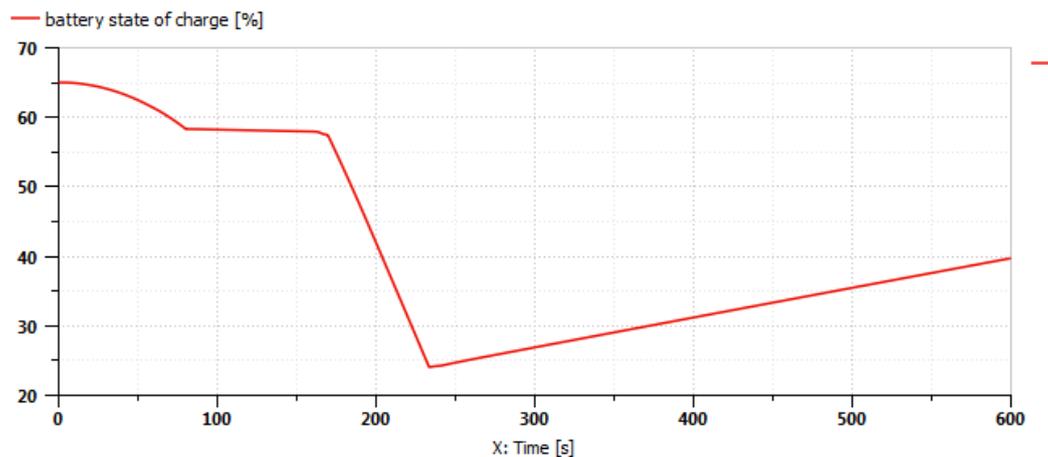


Fig. 5.27: Andamento stato di carica della batteria.

Per questa manovra riportiamo l'andamento del PR su SR in Fig.5.28.

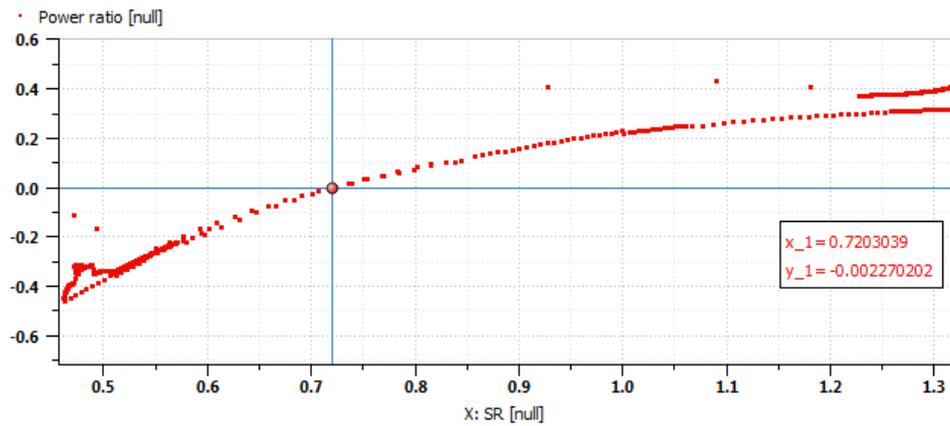


Fig. 5.28: Andamento PR in funzione di SR e punto meccanico.

Rispetto alla manovra precedente si ha un incremento del PR verso SR maggiore a sostenere la condizione in cui vi è maggiore potenza elettromeccanica in gioco. In Fig.5.29 è riportato l'andamento delle velocità nel PSD.

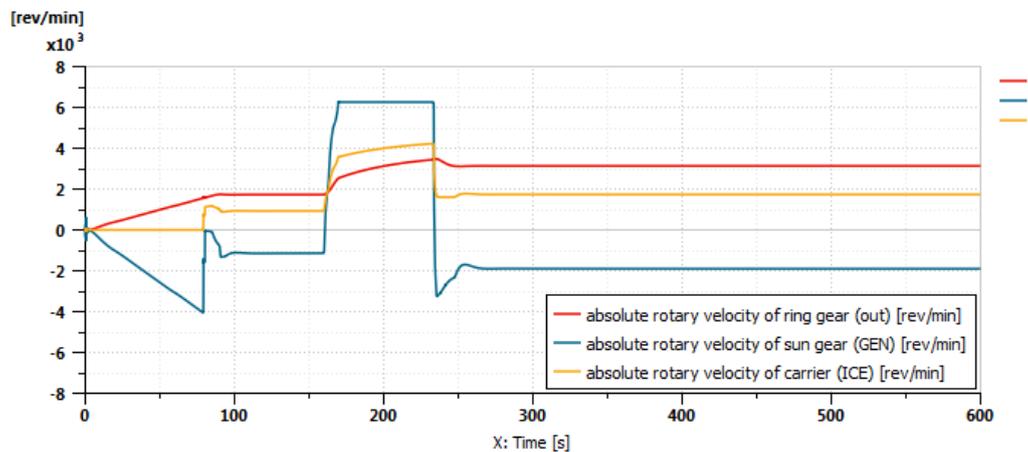


Fig. 5.29: Andamento delle velocità nel PSD.

L'andamento della efficienza EVT rispetto al parametro SR è riportato nella Fig.5.30. Anche in questo caso per valori bassi e alti di SR il rendimento del sistema EVT tende a diminuire.

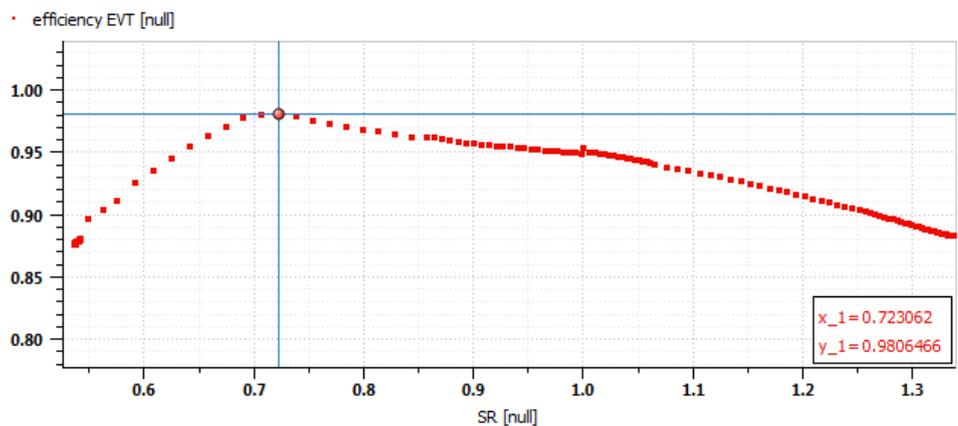


Fig. 5.30: Andamento efficienza EVT in funzione di SR.

5.4 Analisi su ciclo NEDC tratto extraurbano, con stato di carica pari al 65[%] e 40 [%]

Dopo aver analizzato delle rampe di accelerazione e successivamente dei tratti a velocità costante, in questo paragrafo sarà analizzato una parte del ciclo NEDC destinata alla zona ad alta velocità. In Fig.5.31 è riportata la velocità imposta dal driver, percorsa ed inseguita dal veicolo, inizialmente con uno stato di carica del 65 [%] poi al 40 [%].

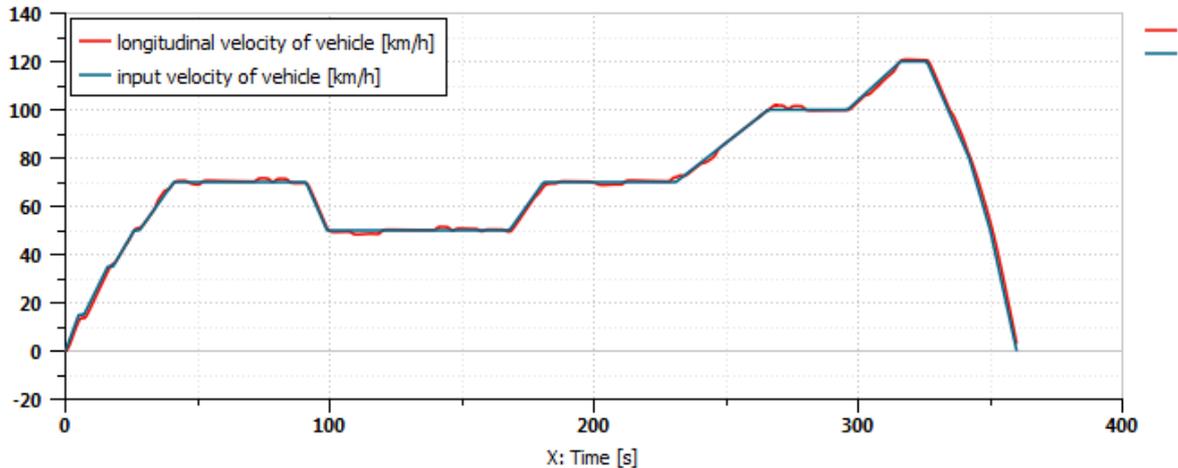


Fig. 5.31: Analisi inseguimento della velocità di riferimento veicolo.

Il veicolo avente lo stato di carica al 65 [%] in un primo tratto avrà una modalità elettrica pura in cui il motore EM1 sarà il principale propulsore.

Il motore termico viene attivato successivamente su richiesta di una più alta potenza alle ruote e la sua velocità è gestita e regolata mediante il motore EM2.

Durante tutto il percorso il motore EM1 accompagnerà il motore termico nei transitori di accelerazione e sarà responsabile del ricircolo di potenza destinata alla rigenerazione della batteria, ottenuta soprattutto della frenata rigenerativa che avviene in prossimità dei tratti al 100 [s] e 350 [s].

La macchina elettrica EM2 si comporta maggiormente come un motore elettrico, poco come generatore e accompagna ICE durante la propulsione fornendo una potenza nel tempo che non supera i 5 kW tranne dal 300 [s] in cui aumenta a circa 10 kW.

ICE lavora nella maggior parte del tempo in punti ad alta efficienza sulla linea di ottimo con numeri di giri che non supera i 3000 [rpm] e coppia che non va oltre i 130 [Nm].

Per quanto riguarda la potenza erogata dalla batteria, si avrà una richiesta di potenza importante durante il funzionamento in modalità pura elettrica, come previsto, mentre durante la maggior parte del funzionamento la batteria eroga solo una potenza che non supera i 5 kW e parte della potenza che viene rigenerata dal motore EM1 viene direttamente utilizzata dal motore EM2.

Sono riportati i grafici, Fig.5.32, Fig.5.33 e Fig.5.34 che mostrano l'andamento della potenza nel tempo del motore ICE, EM 2 , EM 1 e della batteria.

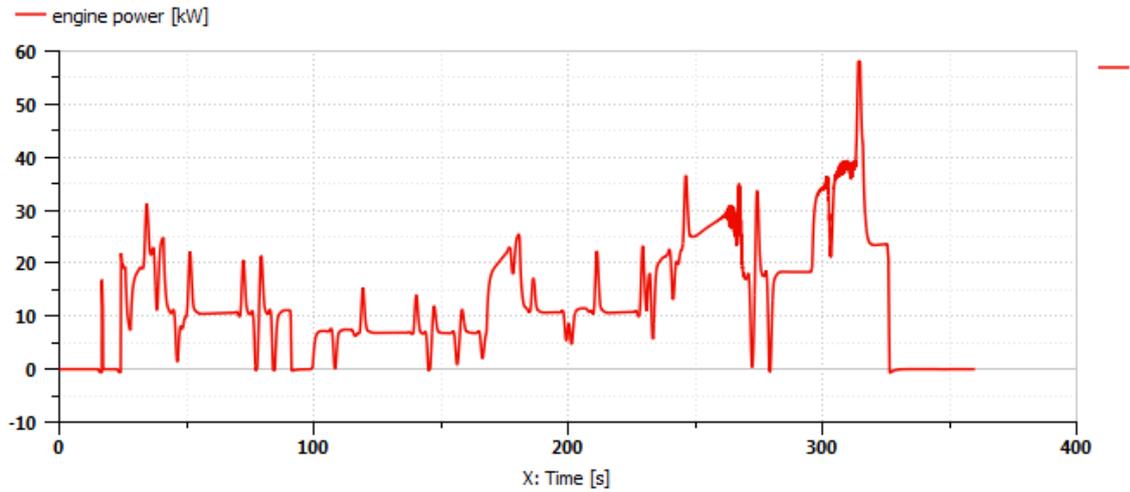


Fig. 5.32: Andamento potenza ICE.

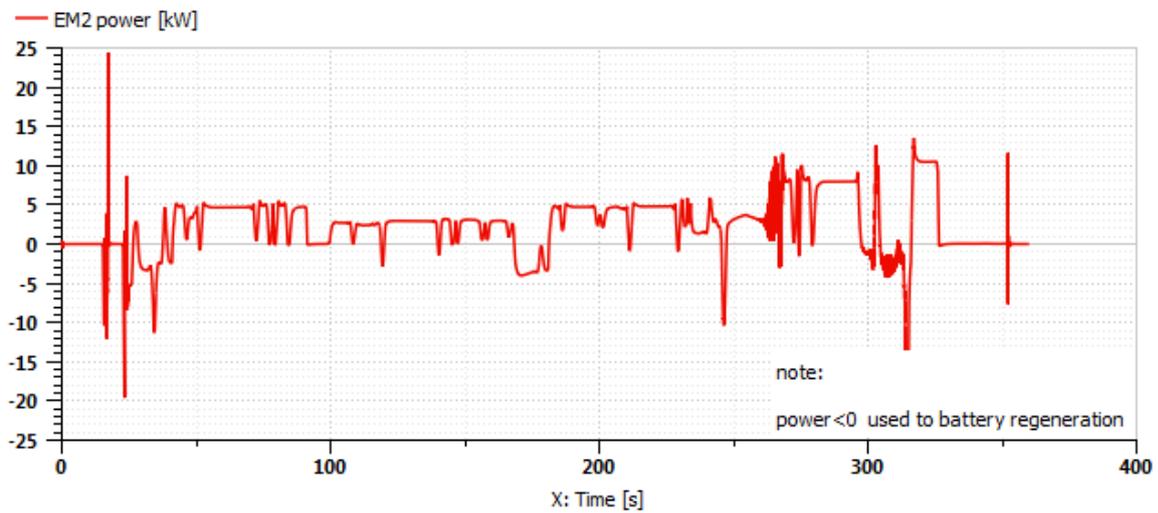


Fig. 5.33: Andamento potenza EM 2.

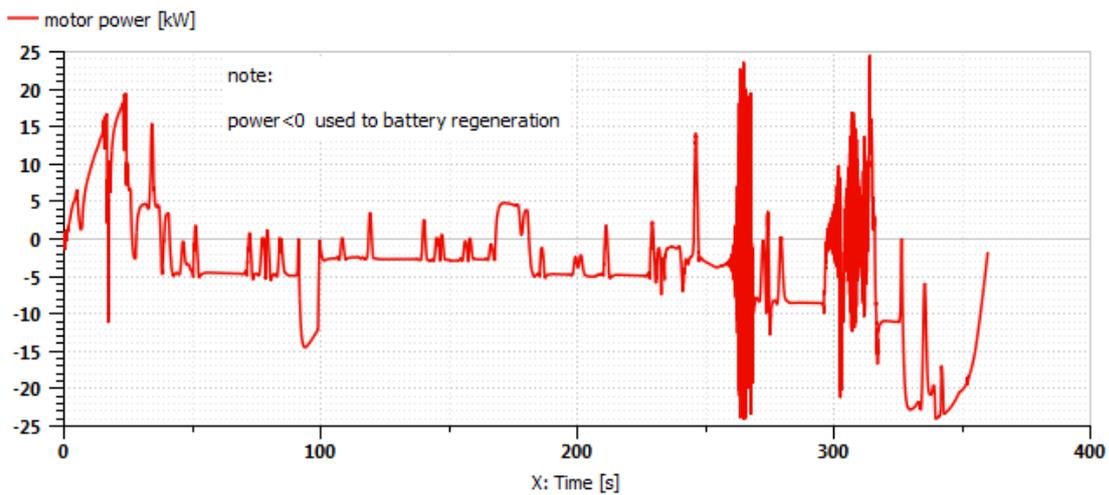


Fig. 5.34: Andamento potenza EM 1.

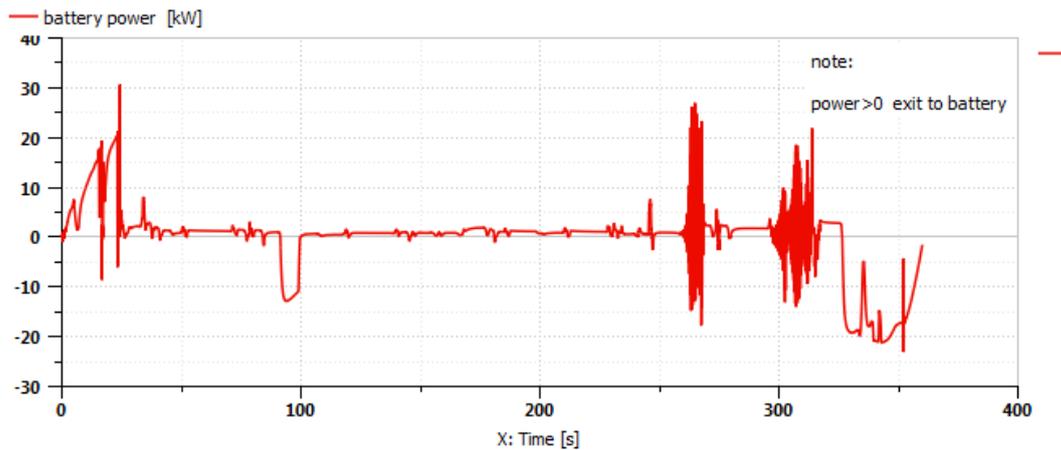


Fig. 5.35: Andamento potenza batteria.

La Fig.5.36 mostra l'andamento dello stato di carica della batteria nel tempo, esso si mantiene ad uno stato accettabile non scende al di sotto del 55 [%] e in corrispondenza della frenate si ha un ripristino che fa in modo di ottenere uno stato di carica finale uguale a quello iniziale.

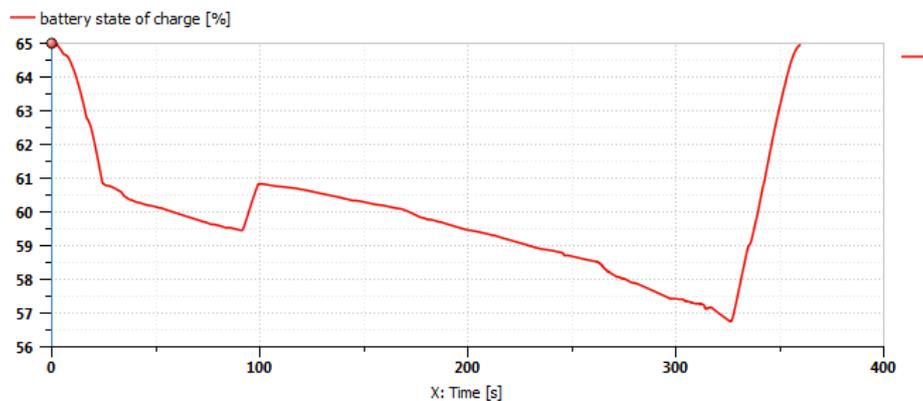


Fig. 5.36: Andamento stato di carica della batteria.

In Fig.5.37 e Fig.5.38 sono riportati gli andamenti del Power Ratio e dell'efficienza in funzione dello Speed Ratio. Si ha un punto meccanico per un valore di $SR = 0.72$ e in corrispondenza di ciò una più alta efficienza del sistema EVT.

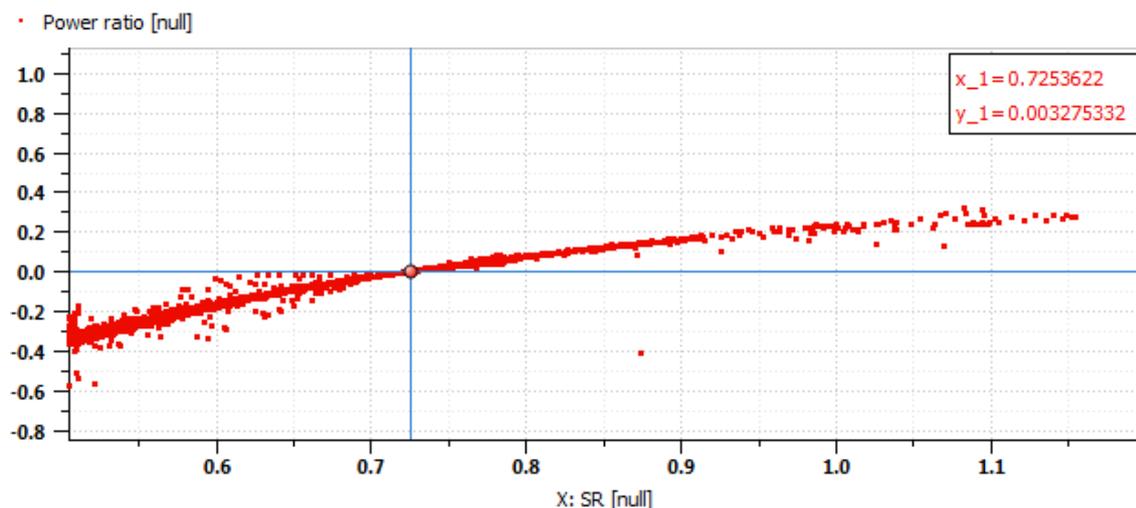


Fig. 5.37: Andamento PR in funzione di SR e punto meccanico.

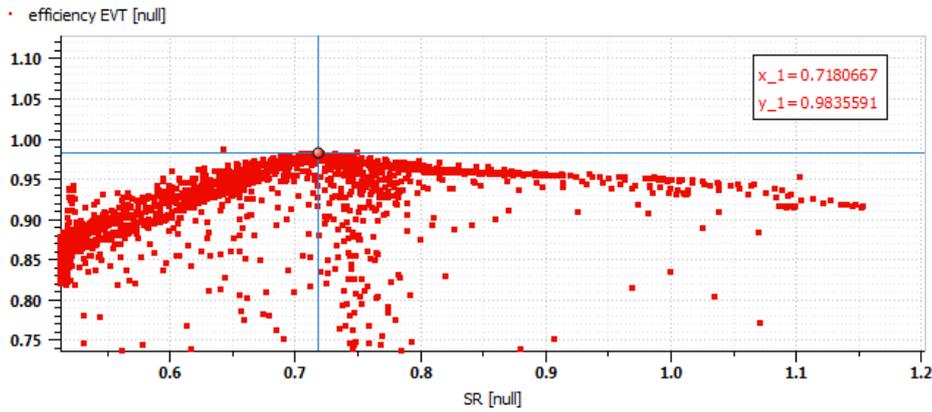


Fig. 5.38: Andamento efficienza EVT in funzione SR.

Inoltre l'andamento nel tempo del rapporto tra la velocità del motore e quella delle ruote rimane circa pari a 4 con alcuni picchi fino al valore di 3.5 . Per quanto riguarda l'analisi con lo stato di carica del veicolo al 40 [%] si ha l'accensione del motore termico fin dall'inizio, non si ha trazione elettrica pura. La macchina elettrica EM 2 si comporta da generatore nella rampa iniziale di accelerazione fino a raggiungere la velocità di 70 [km/h] e in seguito lavora come motore elettrico. La macchina EM 1 invece nella parte iniziale assiste ICE durante la propulsione e in seguito si occupa della rigenerazione della batteria. L'andamento nel tempo della potenza della batteria è sempre negativa, a conferma della rigenerazione e in corrispondenza delle frenate si ha una maggiore quantità di potenza rigenerata. Lo stato di carica ha un andamento crescente nel tempo e raggiunge un valore finale pari a circa il 60 [%]. Il valore del Power Ratio in funzione dello Speed Ratio non varia di molto è compreso in un intervallo tra 0.4 e -0.4 , mentre il valori dell'efficienza sono circa costanti.

5.5 Analisi su ciclo NEDC tratto urbano, con stato di carica pari al 65[%] e 40[%]

Le analisi effettuate fin ora si riferivano ad dei tratti di strada extraurbana dove si raggiungevano elevate velocità. Ora consideriamo un tratto di strada urbana considerando i primi 200 secondi di un ciclo NEDC. Obiettivo è quello di capire come si comporta il veicolo in una strada urbana soggetta ad accelerazioni e decelerazioni prima con uno stato di carica pari al 65 [%] poi al 40 [%].

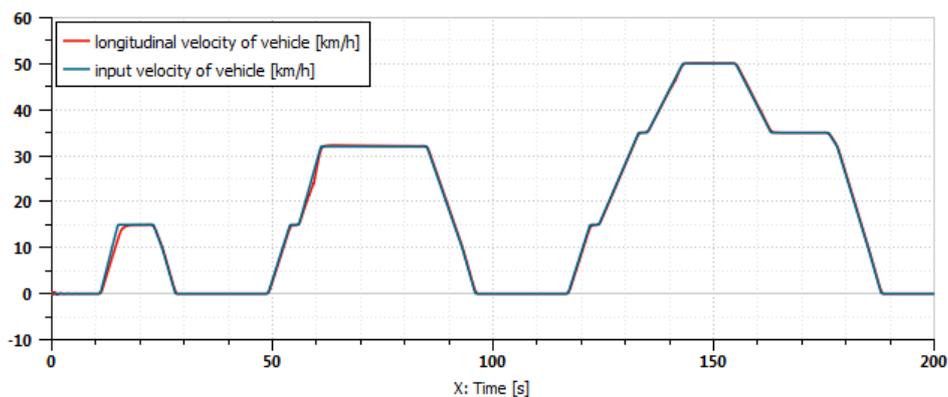


Fig. 5.39: Analisi inseguimento della velocità di riferimento.

Per quanto riguarda la simulazione con uno stato di carica iniziale al 65 [%], si ottengono i seguenti risultati. In Fig.5.40 viene mostrata la velocità dei motori in corrispondenza del PSD.

Come si può notare ICE rimane spento per quasi tutto il tempo di funzionamento e la trazione è consentita in puro elettrico esclusivamente dal motore EM 1.

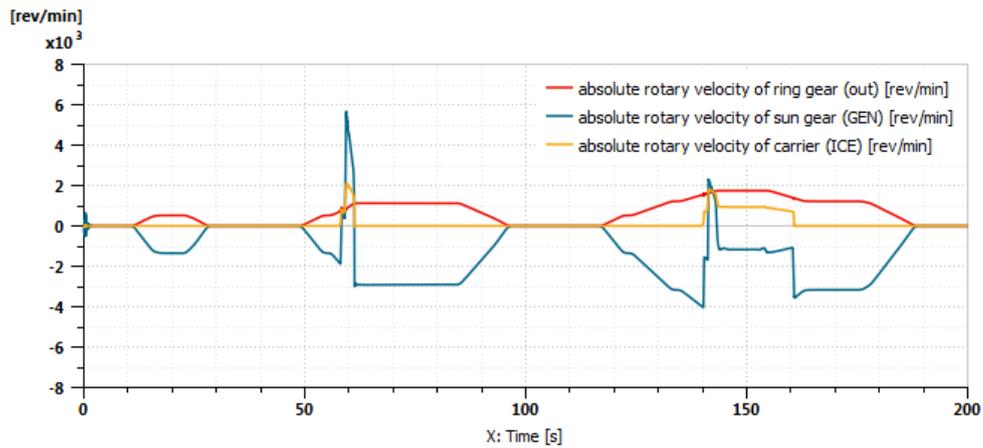


Fig. 5.40: Andamento delle velocità nel PSD.

Il quale elabora una potenza il cui andamento è visibile nella Fig.5.41.

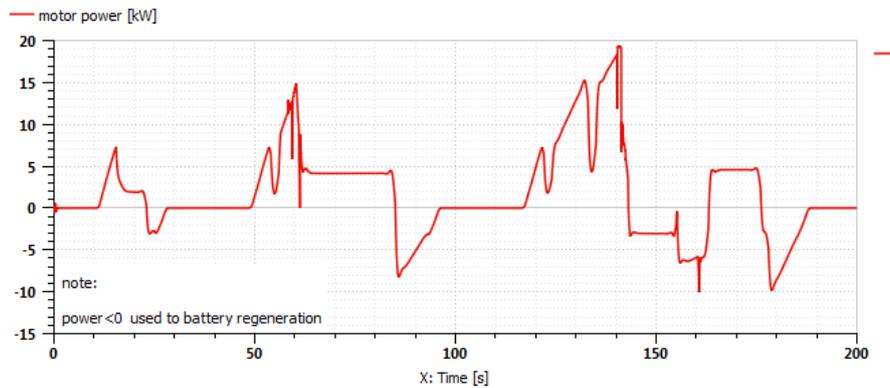


Fig. 5.41: Andamento della potenza EM 1.

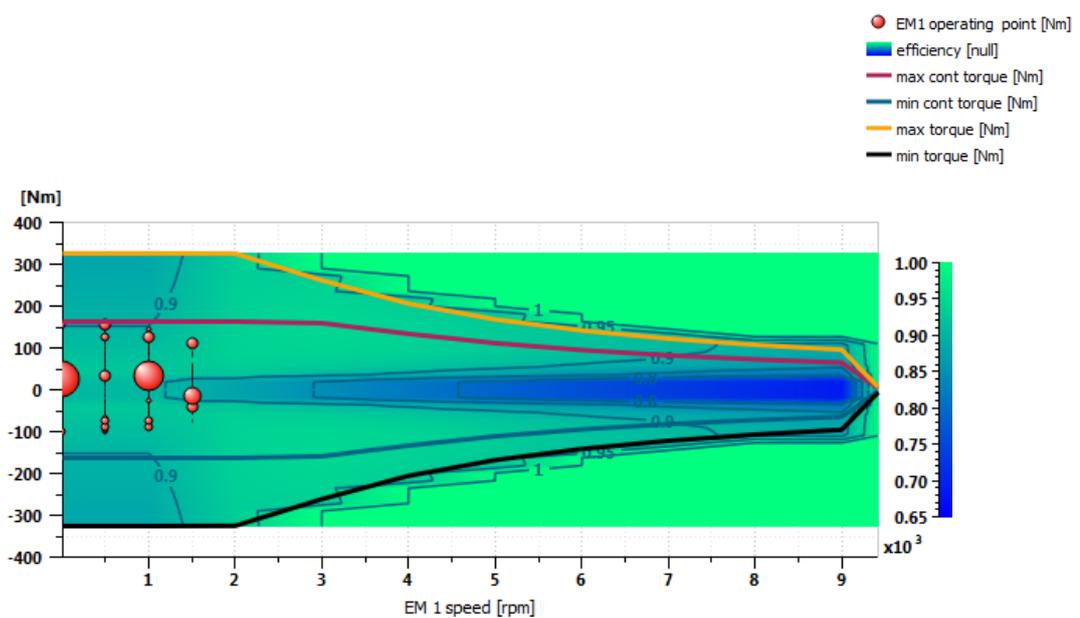


Fig. 5.42: Punti di funzionamento EM 1.

In corrispondenza di questa funzionalità il motore EM 2 invece eroga una potenza positiva prossima a 0 dato che la coppia che eroga è molto bassa. Vi sarà un picco di potenza negativa in corrispondenza di picchi positivi di potenza ICE e quindi funzionamento da generatore e in seguito un tratto in cui eroga una potenza positiva li dove la velocità ICE viene mantenuta costante e il motore EM 1 rigenera la potenza, l'andamento si è omesso di riportarlo. Si riporta invece l'andamento della potenza ICE per constatare il suo funzionamento in Fig.5.43.

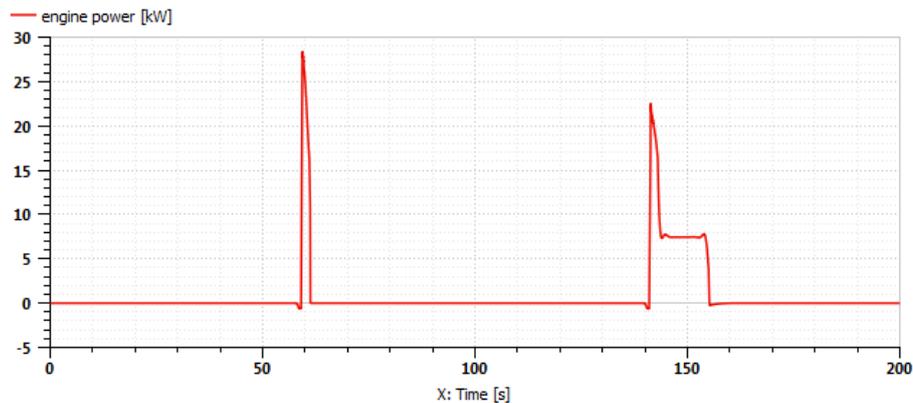


Fig. 5.43: Andamento potenza ICE.

Si riporta lo stato di carica della batteria, Fig.5.44, che dal valore iniziale di 65 [%] scende poco al di sotto del 59 [%].

In questa condizione lo SR presenta un campo che varia tra 0.5 e 1.1 e il PR da 0.42 a -0.4. Per quanto riguarda l'efficienza si avrà un massimo in corrispondenza di un SR pari a 0.9, oltre il punto meccanico.

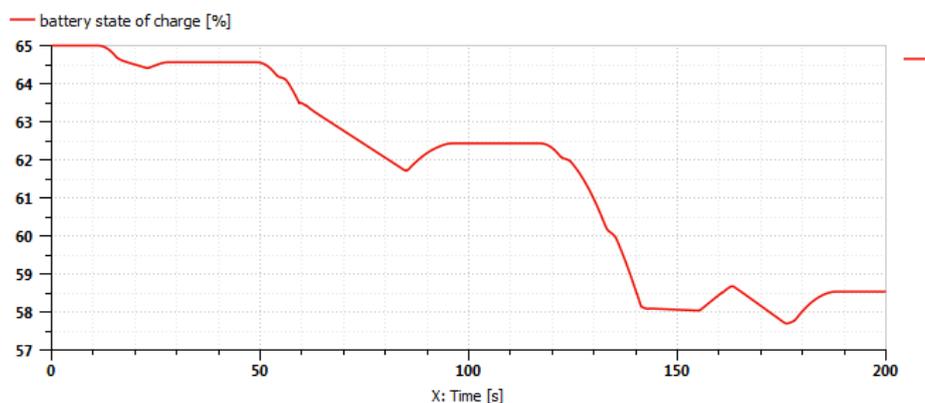


Fig. 5.44: Andamento stato di carica della batteria.

Il passo successivo è stato ripetere la medesima analisi impostando uno stato di carica iniziale del 40 %. In questo modo ICE viene azionato fin da subito e contribuisce sia alla trazione che alla ricarica della batteria. Infatti in Fig.5.45, Fig.5.46, Fig.5.47, Fig.5.48 e Fig.5.49 sono riportati rispettivamente gli andamenti della velocità dei motori in corrispondenza del PSD, l'andamento della potenza EM1 , potenza ICE, potenza EM2 e dello stato di carica SOC. Il motore EM1 assiste ICE nei transitori di accelerazione e successivamente partecipa al ricircolo di potenza. Il EM2 funziona esclusivamente come generatore per far risalire lo stato di carica ad un valore accettabile. ICE ha il ruolo principale nella trazione del veicolo ma anche nella ricarica della batteria, appena lo stato di carica si allontana dal minimo desiderato, si può utilizzare potenza per l'utilizzo dei motori elettrici.

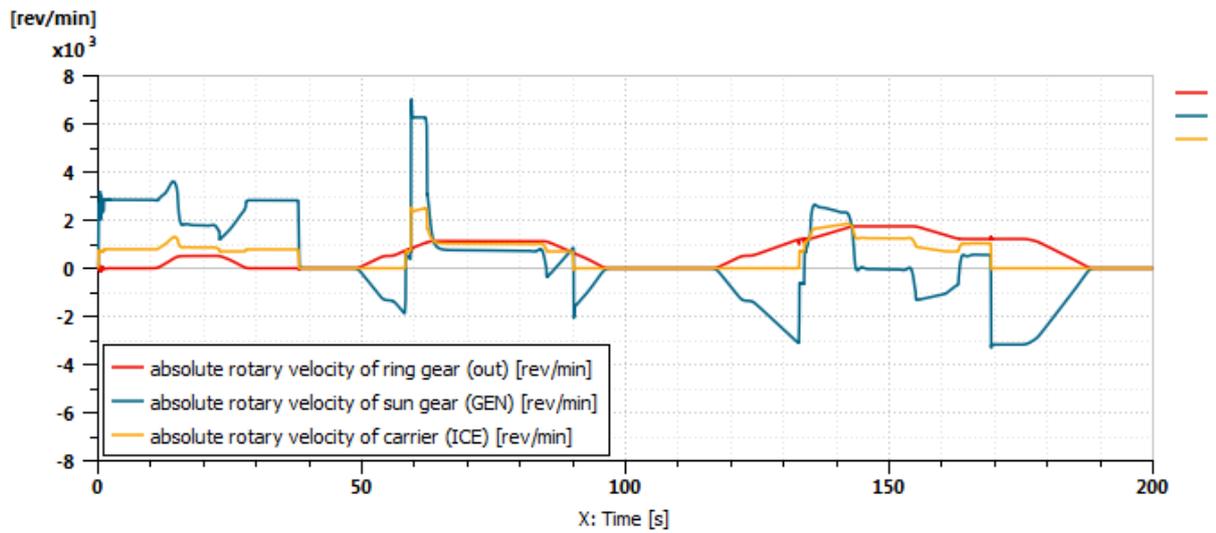


Fig. 5.45: Andamento delle velocità nel PSD.

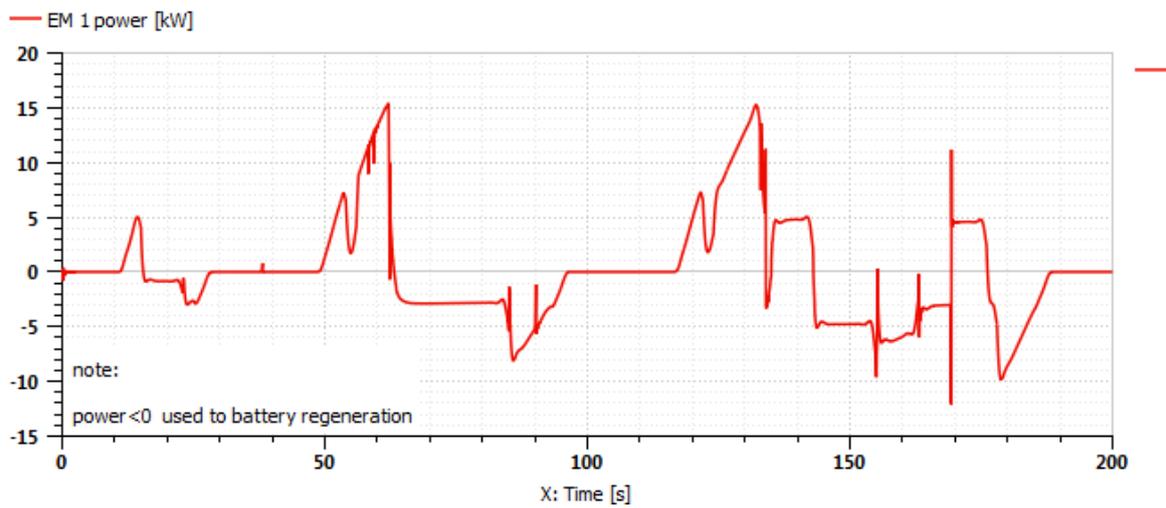


Fig. 5.46: Andamento potenza EM 1.

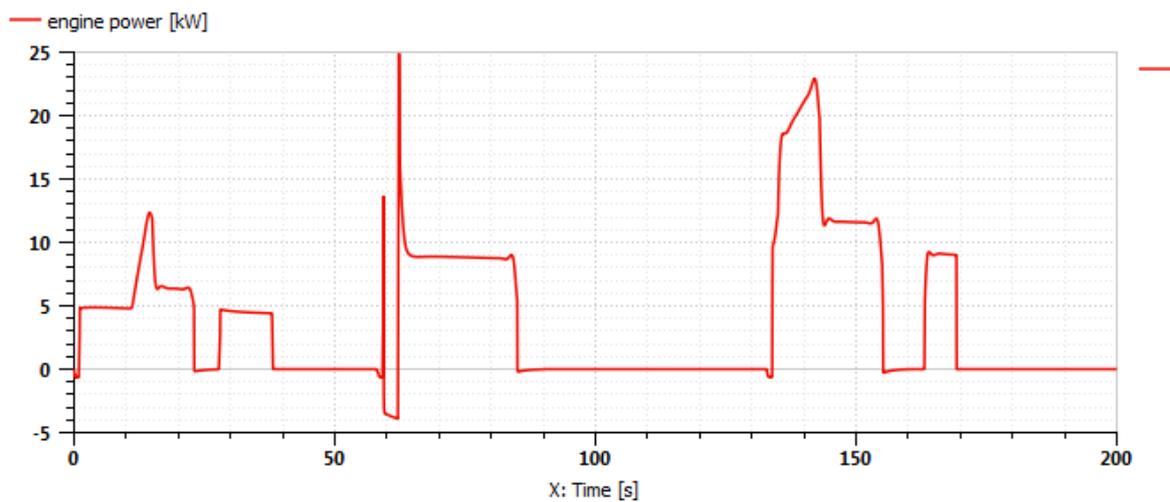


Fig. 5.47: Andamento potenza ICE.

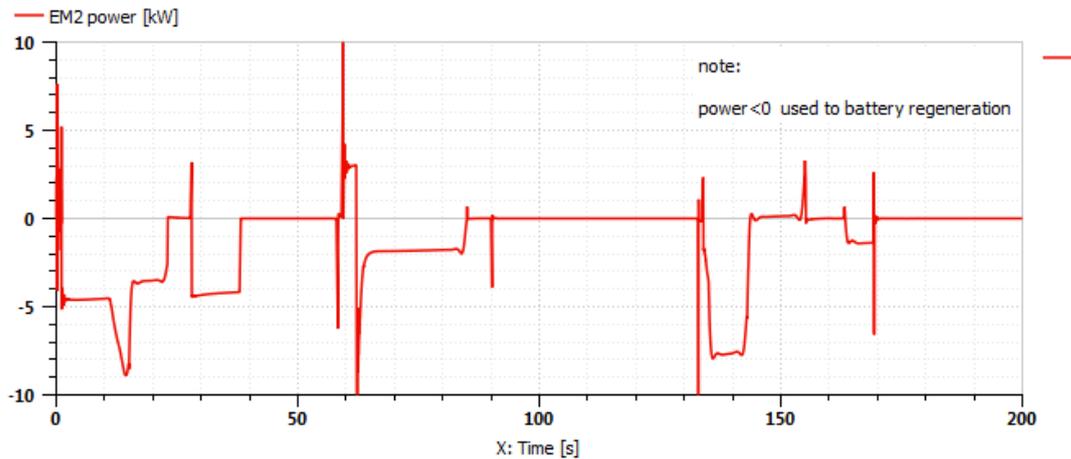


Fig. 5.48: Andamento potenza EM 2.

Infatti l'andamento dello stato di carica è oscillatorio, si fa in modo di ripristinarlo ad un valore superiore al 40%, limite minimo, si ha un aumento del 2 % circa. Appena diviene superiore alla quota minima, si può attingere dalla batteria per poter alimentare il motore EM1 che fornisce potenza aggiuntiva in corrispondenza delle accelerazioni.

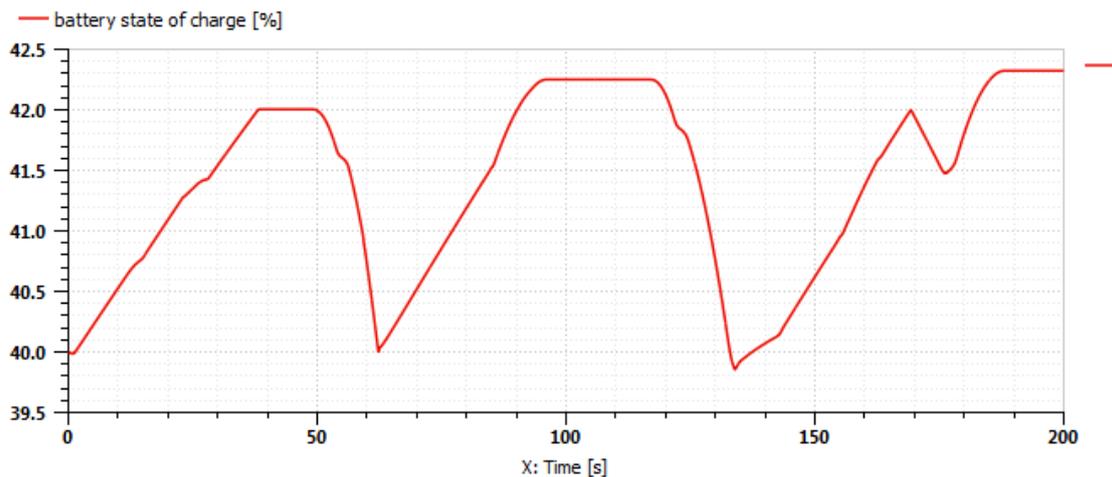


Fig. 5.49: Andamento stato di carica della batteria.

In questa condizione lo SR presenta un campo che varia tra 0.5 e 1.3 e il PR da 0.35 a -0.35. Per quanto riguarda l'efficienza si avrà un massimo in corrispondenza di un SR pari a 1.1 , anche il questo caso oltre il punto meccanico.

5.6 Analisi consumo di carburante su ciclo WLTC e WLTC ridotto

In questa ultima analisi sono stati rilevati i consumi di combustibile su un ciclo completo WLTC partendo da una simulazione avente delle penalità di driveability intermedie, come effettuato per gli altri modelli riportati in precedenza. La Tabella 5.1 riporta i risultati ottenuti.

	Risultati simulazione mediante HOT
Penalità accensione motore termico (tempo della penalità)	500 [W] (4 [s])
Penalità spegnimento motore termico (tempo della penalità)	200 [W] (2 [s])
Fattore di equivalenza s :	2.8 [-]
Consumo di combustibile:	5.69 [l/100km]
Consumo di combustibile corretto:	5.72 [l/100km]
Energia totale persa:	42.28 [MJ]

Tabella 5.1: Penalità per tre diverse simulazioni.

Al fine di valutare il consumo distinto tra area urbana ed extraurbana è stata eseguita inizialmente una simulazione fino al tempo 1000 [s] considerando solo gli 8 [km] del ciclo urbano escludendo la parte ad alta velocità. Una seconda simulazione è stata eseguita considerando a parità di spazio percorso la parte di ciclo extraurbana, Tabella 5.2.

	WLTC Parte urbana	WLTC Parte extraurbana
Spazio percorso [km]	8	8
Consumo combustibile corretto [l/100km]	4.44	7.49

Tabella 5.2: Confronto consumi per percorso urbano e extraurbano.

6 CAPITOLO: VEICOLO IBRIDO ELETTRICO SERIE PARELLEO EVT 2 MODE

In questo Capitolo sono riportate le analisi e i risultati effettuati su un veicolo ibrido elettrico serie parallelo complesso che utilizza un EVT 2 mode.

È stato creato un modello meccanico fisso e una serie di controlli differenti per l'utilizzo delle diverse modalità di funzionamento che si possono selezionare con il fine di analizzare le condizioni operative dei componenti. Come spiegato nel Capitolo 5, per l'architettura EVT 1 mode è consono lavorare con SR in corrispondenza del punto meccanico li dove l'efficienza del sistema EVT è migliore. Si è potuto riscontrare, nelle diverse analisi, che in condizioni di funzionamento per cui il la velocità del veicolo è elevata e valori SR bassi si ha un calo dell'efficienza. Per cui nell'architettura EVT 1 mode si è fatto in modo di limitare il range di funzionamento di SR per evitare il calo dell'efficienza del sistema. Pertanto una soluzione è rappresentato da un sistema ibrido multimodale, il quale, aumentando il numero di punti meccanici consente una maggiore flessibilità operativa.

Quindi il sistema EVT 2 mode permette di selezionare in modo fluido due modalità di funzionamento power split, con l'obiettivo di ottenere due punti meccanici e avere in corrispondenza di questi un'efficienza del sistema è alta. Questo da la possibilità di poter lavorare in un range di SR in cui l'efficienza totale del sistema è l'involuppo delle due curve di efficienza che si ottengono per le due modalità power split, di conseguenza permette di ampliare il range di SR ad una più alta efficienza.

Nella Fig. 6.1 è rappresentato lo schema meccanico del sistema EVT 2 mode. Si analizza un volume di controllo che ha in ingresso la potenza ICE e in uscita la potenza out proporzionale alla potenza alle ruote del veicolo. Il sistema è complesso data la presenza di due PSD, due propulsori elettrici, un motore termico e frizioni.

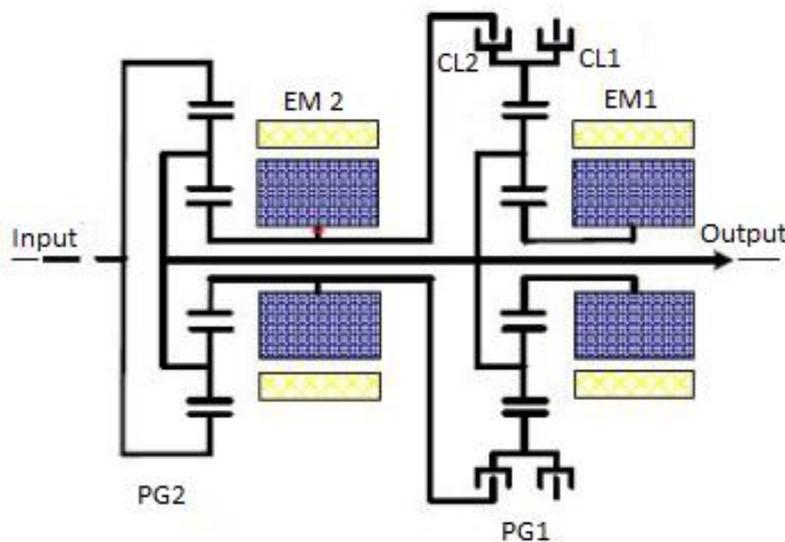


Fig. 6.1: Volume di controllo del sistema EVT 2 mode.

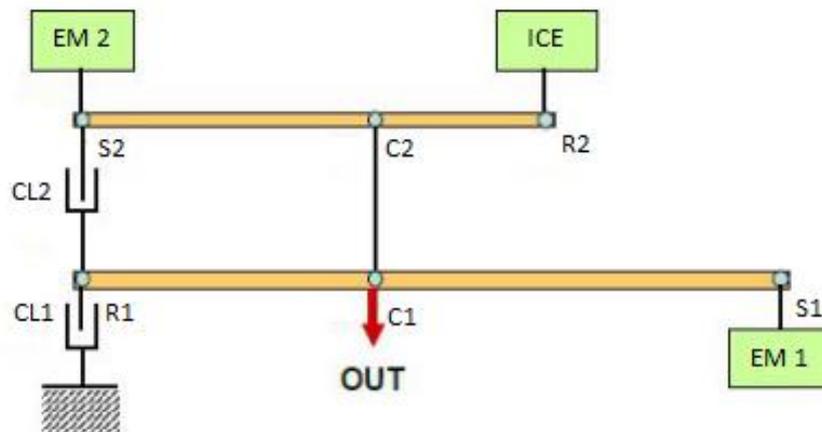


Fig. 6.2: Schema rappresentativo del sistema EVT 2 mode con connessione ai motori.

Come si può evincere, anche in Fig. 6.2, il collegamento dei motori al PSD 2 è differente al caso di EVT 1 mode. In queste condizioni EM 2 è collegata al solare S2 e ICE alla corona R2, mentre l'uscita avviene in corrispondenza del portatreno C2. L'uscita di C2 è collegata all'ingresso di C1 sul PSD 1. Il motore EM 1 è connesso al solare S1 del PSD 1.

Grazie alla presenza di due frizioni CL 1 e CL 2 inserite a ridosso della corona R1 permette di poter selezionare due tipi di modalità di funzionamento, una input split e una compound split. Le due frizioni CL 2 e CL 1 lavorano assieme ma in modo opposto, la chiusura di una implica l'apertura dell'altra.

Se CL 2 è aperta e CL 1 chiusa, selezionando allora la modalità input split, la corona R1 è connessa ad un vincolo rigido che impone velocità nulla, nel PSD 1 quindi la velocità out dipende solo dalla velocità del motore EM 1. Viceversa se CL 2 è chiusa e CL 1 aperta, la corona R1 è connessa al solare S2 il quale a sua volta è connesso a EM 2.

Questo ci permette di effettuare un ulteriore split di potenza, anche a valle, per cui in queste condizioni si avvia la modalità compound split.

Attraverso il software LMS Amesim si è creato un modello numerico di veicolo ibrido serie parallelo con sistema EVT 2 mode, utilizzando talune specifiche tecniche utilizzate dai ricercatori e ingegneri di GM.

In Fig. 6.3 è riportato l'interno modello meccanico privo della logica di controllo. Il software non permetteva l'utilizzo di centraline con logiche di controllo già implementate, da utilizzare o tarare nel caso specifico, per cui si è scelto di utilizzare un controllo mediante una logica a blocchi basata sulle equazioni cinematiche e dinamiche dei rotismi epicicloidali effettuando delle ipotesi sul funzionamento del motore termico e con la realizzazione di un controllo retroattivo mediante correzione degli errori di velocità con PID, come vedremo in seguito. Ciò dà la possibilità di dare i comandi di coppia ai motori e allo stesso tempo effettuare un controllo sulla velocità del veicolo e dei vari motori.

Per cui in tale architettura la logica di controllo è stata eseguita in modo differente per le varie modalità di funzionamento.

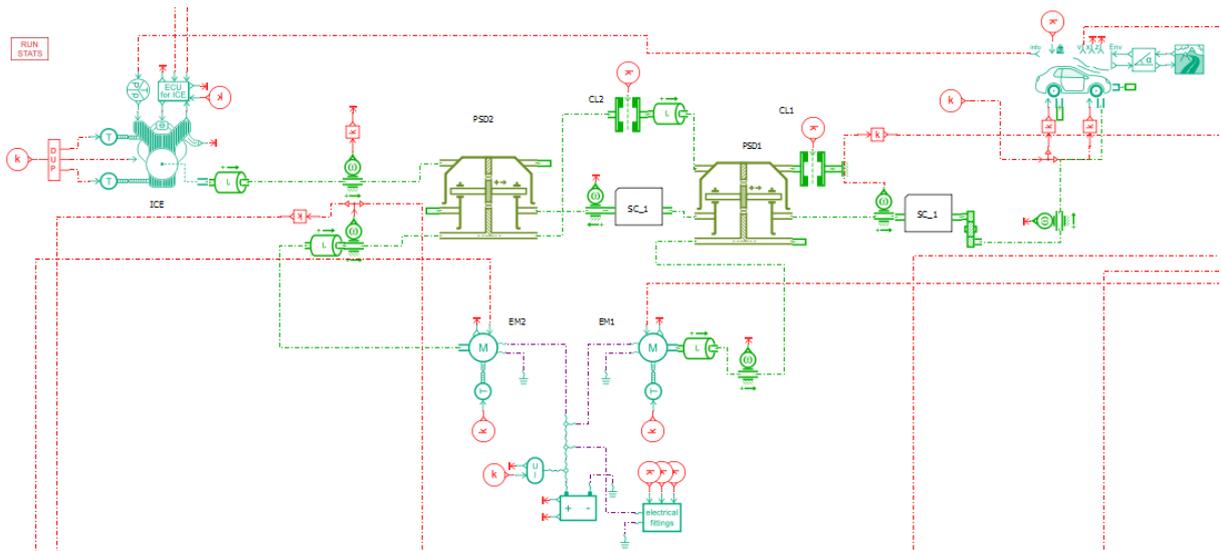


Fig. 6.3: Modello meccanico veicolo ibrido serie parallelo EVT 2 mode

Pertanto il veicolo è equipaggiato con gli stessi motori elettrici, motore termico e batteria utilizzati per il veicolo serie parallelo EVT 1 mode, le specifiche tecniche sono riportate nel Capitolo 5.

Il sistema di trasmissione è differente, come accennato in precedenza, data la diversa connessione dei motori al PSD. Infatti utilizzando due PSD, PSD 1 e PSD 2 che hanno il medesimo rapporto tra i denti:

$$\tau_{PSD 1} = \tau_{PSD 2} = \frac{T_{ice}}{T_{out}} = \frac{N_s + N_R}{N_R} = 1.42 \quad \frac{1}{\tau_{PSD 1/2}} = 0.7015$$

In particolare per entrambi i PSD:

$$\frac{N_R}{N_s} = 2.35$$

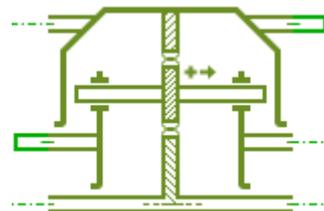


Fig. 6.4: Esempio PSD 2.

In cui:

- $\tau_{PSD1/2}$ rapporto trasmissione PSD 1/2;
- N_s numero denti sun;
- N_R numero denti ring;
- T_{ice} coppia ICE;

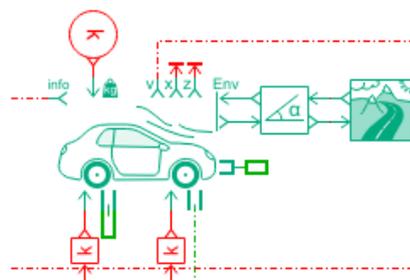
- T_{out} coppia out EVT.

Infine il resto della trasmissione può essere definito mediante un rapporto di trasmissione finale, dato dal rapporto della velocità alle ruote sulla velocità all'uscita del EVT.

$$\tau_f = \frac{w_R}{w_{OUT}} = 3.02$$

Per quanto riguarda le caratteristiche del veicolo sono riportate in tabella (suggerite da Yalian Yang, Xiaosong Hu, Pei Huanxin, Zhiyuan Peng in “*Comparison of power-split and parallel hybrid powertrain architectures with a single electric machine: dynamic programming approach*”):

Sezione frontale veicolo:	2.64	[m ²]
Coefficiente aerodinamico Cx:	0.37	[-]
Coefficiente di attrito statico f	0.01	[-]
Larghezza pneumatico:	195	[mm]
Altezza pneumatico:	65	[%]
Diametro cerchio:	0.3423	[m]
Inerzia ruota:	0.5	[kg m ²]
Massa totale veicolo:	1180	[kg]



Definiti i diversi componenti analizziamo nello specifico le diverse modalità di funzionamento, effettuando in primis, per implementare la logica di comando un'analisi cinematica e statica della:

- Modalità pura elettrica;
- Modalità EVT input split;
- Modalità EVT output split.

	CL 1	CL 2
Modalità pura elettrica	1	0
Modalità EVT input split	1	0
Modalità EVT output split	0	1

Tabella 6.1: Segnale apertura/chiusura della frizione, 1 frizione chiusa, 0 frizione aperta.

6.1 Modalità Pura Elettrica

La modalità pura elettrica è possibile quando lo stato di carica è sufficientemente elevato ad esempio ad 65 [%] permettendo la trazione con il solo motore elettrico EM 1. Tale modalità è

selezionabile effettuando la chiusura della frizione CL 1 e l'apertura di CL 2, in modo da avere un funzionamento del PSD 1 con la corona a velocità nulla.

6.1.1 Analisi cinematica

Applicando la formula di Willis ai due rotismi epicicloidali e applicando le condizioni al contorno si è trovato l'equazione parametrica che lega la velocità di uscita EVT con la velocità dei motori elettrici.

Definendo :

$$\rho_2 = \frac{N_{S2}}{N_{R2}} \qquad \rho_1 = \frac{N_{S1}}{N_{R1}}$$

Per i diversi rotismi scriviamo le equazioni:

PSD 2:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_{R2} - \omega_{C2}}{\omega_{S2} - \omega_{C2}} = -\rho_2 \\ \omega_{C2} = \omega_{out} \\ \omega_{R2} = \omega_{in} = \omega_{ICE} = 0 \\ \omega_{S2} = \omega_{EM2} \end{array} \right.$$

PSD 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\omega_{R1} - \omega_{C1}}{\omega_{S1} - \omega_{C1}} = -\rho_1 \\ \omega_{C1} = \omega_{C2} = \omega_{out} \\ \omega_{R1} = 0 \\ \omega_{S1} = \omega_{EM1} \end{array} \right.$$

Equazione parametrica finale è data da:

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{EM1} = a_1 \omega_{out} \\ \omega_{EM2} = \frac{1}{a_3} \omega_{out} \end{array} \right. \qquad \left\{ \begin{array}{l} a_1 = \frac{1 + \rho_1}{\rho_1} \\ a_3 = \frac{\rho_2}{1 + \rho_2} \end{array} \right.$$

Questo permette di mettere in relazione la velocità del motore EM 1 con il motore EM 2. Quindi per far sì che la velocità ICE sia mantenuta nulla si dovrà effettuare un controllo sulla

velocità del motore EM 2, strettamente connesso attraverso il PSD 2 al motore termico e lasciare che la velocità del motore EM 1 si adegui di conseguenza.

6.1.2 Analisi statica

Sono riportate le equazioni che mettono in relazione le coppie dei motori elettrici e termico con la coppia in uscita del EVT. Le equazioni sono state calcolate a partire dalle equazioni di Willis:

PSD 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{S2}}{T_{R2}} = \frac{N_{S2}}{N_{R2}} \\ T_{C2} = -T_{R2} \frac{N_{S2} + N_{R2}}{N_{R2}} \\ T_{C2} = -T_{S2} \frac{N_{S2} + N_{R2}}{N_{S2}} \\ T_{S2} = T_{EM2} \\ T_{R2} = T_{ICE} \end{array} \right.$$

PSD 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{S1}}{T_{R1}} = \frac{N_{S1}}{N_{R1}} \\ T_{C1} = -T_{R1} \frac{N_{S1} + N_{R1}}{N_{R1}} \\ T_{C1} = -T_{S1} \frac{N_{S1} + N_{R1}}{N_{S1}} \\ T_{S1} = T_{EM1} \end{array} \right.$$

Le equazioni parametriche sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{EM2} = b_1 T_{ICE} \\ T_{C2} = b_2 T_{ICE} \\ T_{C1} = b_3 T_{EM1} \\ T_{out} = T_{C2} + T_{C1} = b_3 T_{EM1} + b_2 T_{ICE} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} b_1 = \frac{N_{S2}}{N_{R2}} \\ b_2 = -\frac{N_{S2} + N_{R2}}{N_{R2}} \\ b_3 = -\frac{N_{S1} + N_{R1}}{N_{S1}} \end{array} \right.$$

Inoltre:

$$se \quad T_{ICE} = 0 \rightarrow T_{EM2} = T_S = 0 \rightarrow T_{C2} = 0$$

Quindi :

$$T_{out} = T_{C2} + T_{C1} = T_{C1}$$

Da ciò si evince che la trazione avviene per via del motore EM 1. Data la proporzionalità con il motore termico, la coppia del motore EM 2 è nulla, quindi quest'ultimo ha il ruolo di controllo della velocità del motore termico.

6.1.3 Logica di controllo

L'obiettivo è quello di dare in uscita dal controllo le coppie di comando per i motori elettrici e motore termico. Le ipotesi fatte sono:

- Velocità motore termico $\omega_{ICE} = 0$;
- Profilo di velocità di riferimento: tratto a velocità crescente con accelerazione costante e bassa per permettere una manovra di accelerazione quasi stazionaria da 0 a 50 [km/h].

In Fig. 6.5 è rappresentata la logica di controllo connessa al sistema meccanico precedentemente descritto.

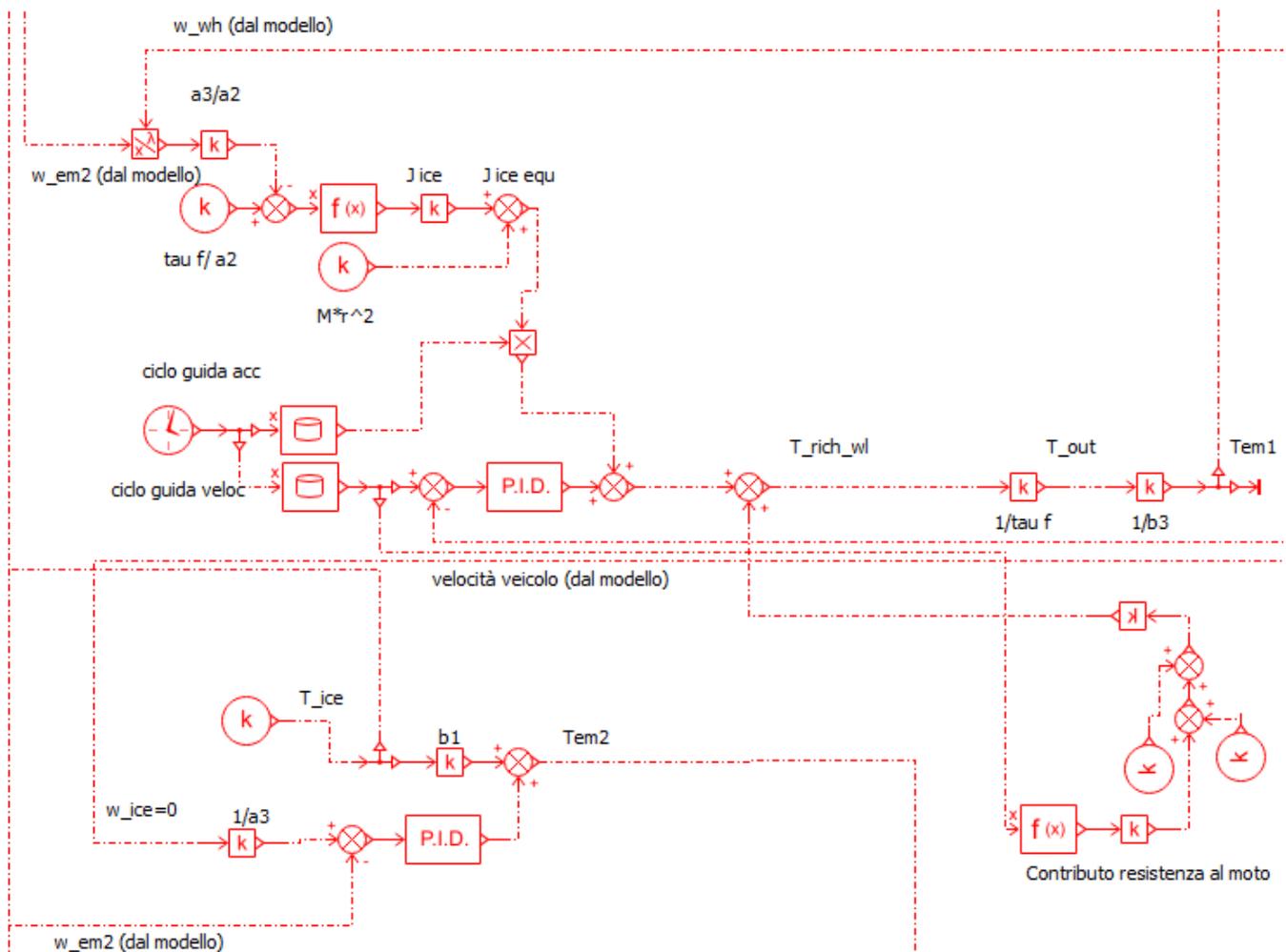


Fig. 6.5: Logica di controllo modalità pura elettrica.

L'inseguimento di velocità imposta dal ciclo guida viene realizzata mediante due contributi:

- Un contributo in anello chiuso, calcolato a partire dall'errore di velocità (riferimento imposto dal ciclo - velocità di feedback misurata dal sensore di velocità);
- Due contributi in anello aperto calcolati a partire dalla velocità e dall'accelerazione istantanea richiesta dal ciclo guida, inseriti per compensare le resistenze al moto stazionarie (aerodinamica e rotolamento) e i contributi inerziali del sistema (forze e coppie di inerzia).

La somma dei due contributi costituisce la coppia richiesta al motore elettrico EM1 che si occupa di propellere il veicolo. Il motore elettrico EM2 avrà invece il compito di regolare la velocità del motore termico in modo da mantenerlo a velocità nulla, in modo da minimizzare le perdite associate al motore stesso che crescono all'aumentare della velocità di rotazione. È stato quindi progettato un controllore PID in grado di regolare la velocità di rotazione del motore elettrico EM2.

Dunque per prima cosa è stato inserito un controllo in retroazione sulla velocità del veicolo che agisce regolando la coppia del motore EM 1, per essere sicuri che il veicolo segua la velocità di riferimento del ciclo di guida. Questo è stato possibile mediante l'aggiunta di un primo controllore PID che ha il ruolo di correggere l'errore tra la velocità di riferimento del ciclo guida con la velocità veicolo rilevata dal sensore di velocità. All'uscita otteniamo un comando di coppia il quale si va a sommare con il contributo inerziale:

$$T_{WHd} = PID(v_{rifVH}, v_{VH}) + J_{WH} \omega_{\dot{WH}}$$

$$J_{WH} = M R^2 + J_{eqICE} = M R^2 + J_{ICE} \left(\frac{\tau_f}{a_2} - \frac{a_3}{a_2} \frac{\omega_{EM2}}{\omega_{WH}} \right)$$

In cui:

- v_{rifVH} riferimento della velocità veicolo, ciclo guida;
- v_{VH} velocità veicolo reale rilevata dal sensore di velocità;
- $\omega_{\dot{WH}}$ accelerazione angolare ruote calcolata da a_{vh} accelerazione di riferimento;
- M massa del veicolo;
- R raggio ruota veicolo.

In seguito considerando τ_f :

$$T_{outd} = \frac{T_{WHd}}{\tau_f}$$

Successivamente se $T_{ICE} = 0$ allora :

$$T_{EM1d} = \frac{T_{outd}}{b_3}$$

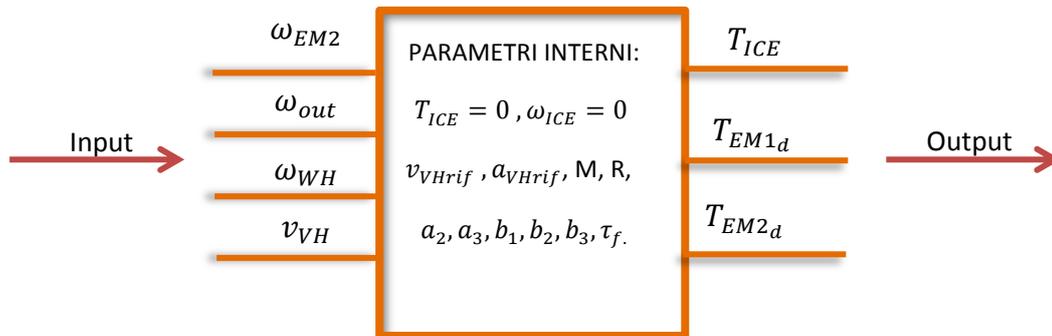
Per quanto riguarda invece il secondo motore elettrico, imposto il vincolo e velocità del motore termico si è determinata la coppia dinamica da fornire al motore EM 2 come contributo feed-forward della parte statica più il contributo dovuto al controllo della velocità EM 2 mediante PID sull'errore di velocità EM 2 :

$$T_{EM2d} = T_{ICE} b_1 + PID(\omega_{rifEM2}, \omega_{EM2})$$

In cui:

- ω_{rifEM2} velocità EM 2 di riferimento calcolata inserendo $\omega_{ICE} = 0$;
- ω_{EM2} velocità EM 2 reale rilevata dal sensore di velocità.

Riportiamo in basso uno schema del sistema chiuso della logica di controllo descritta:



6.1.4 Risultati simulazione

In Fig. 6.6 è riportata l'analisi sull'inseguimento della velocità di riferimento, si evince il veicolo percorre esattamente il riferimento.

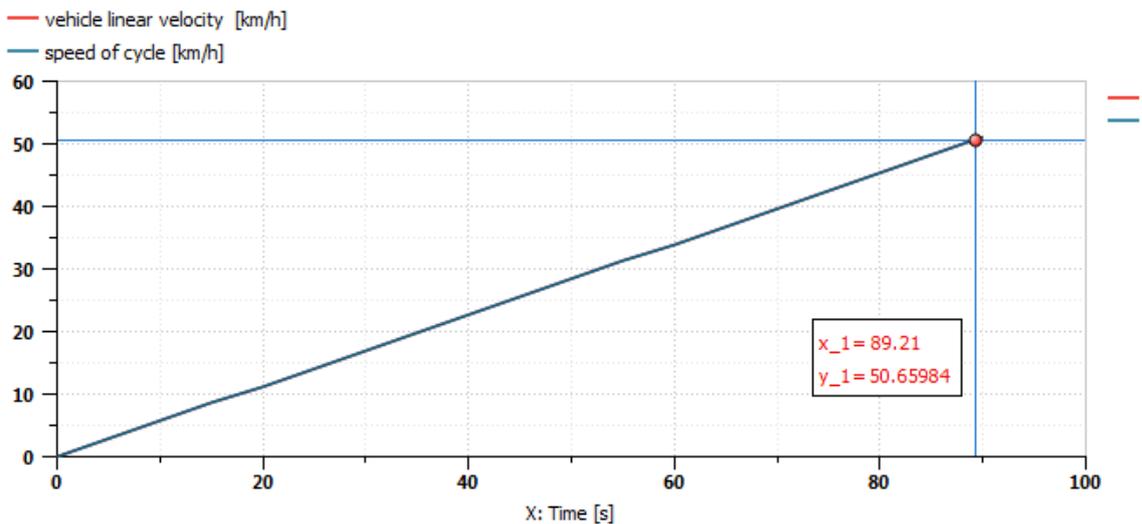


Fig. 6.6: Analisi inseguimento della velocità di riferimento.

In Fig. 6.7 è riportato l'andamento delle velocità in corrispondenza del PSD 2. Si evince che il controllo della velocità EM 2 è ottimo in quanto la velocità del motore termico resta nulla nell'equilibrio del rotismo epicicloidale.

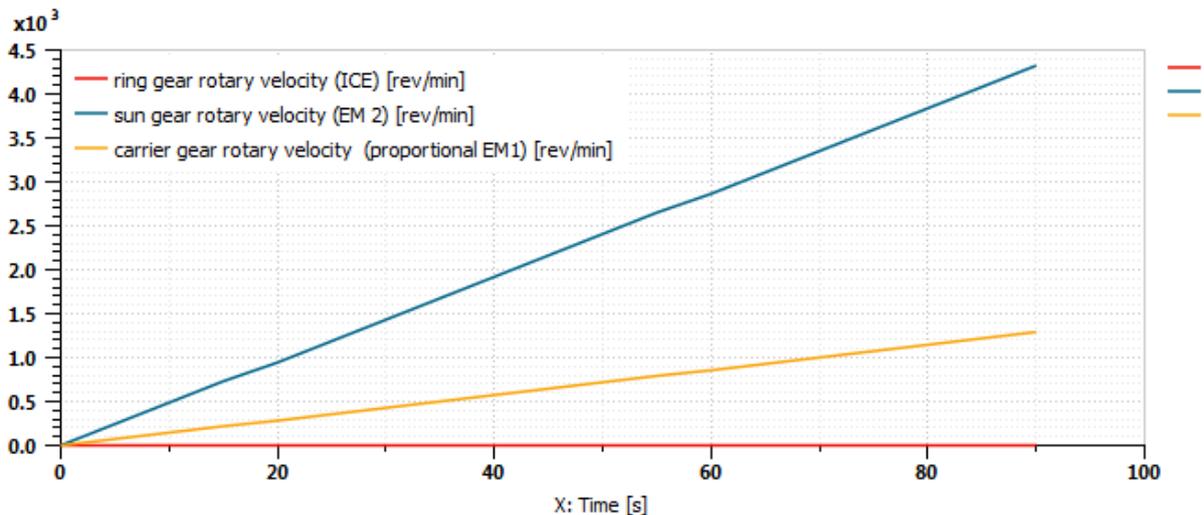


Fig. 6.7: Andamento delle velocità nel PSD 2.

Per quanto riguarda l'andamento delle potenze, la potenza ICE è 0 per ipotesi e la potenza del motore EM 2 è anch'essa uguale a 0. La potenza del motore EM 1 invece è crescente con la velocità e ha un andamento visibile in Fig. 6.8 .

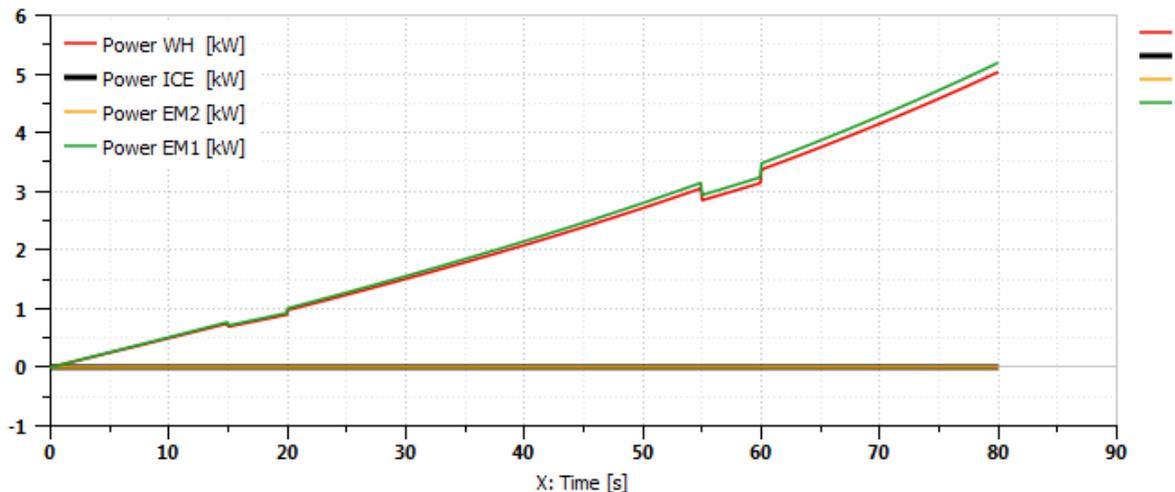


Fig. 6.8: Andamento potenza EM 1, EM2 ICE e WH.

Dato l'accelerazione bassa di $0.15 \text{ [m/s}^2\text{]}$ la coppia necessaria per la trazione del veicolo sarà di conseguenza bassa. I punti di funzionamento del motore EM 1 presentano una coppia di circa 10 [Nm] con un andamento crescente molto basso in funzione della velocità che non supera i 14 [Nm] . Questo è un risultato significativo in quanto grazie al PSD 2 possiamo utilizzare una macchina elettrica EM 1 di taglia più piccola di quella in uso, utilizzata anche nella architettura EVT 1 mode, con un conseguente risparmio di spazio e peso.

Per quanto riguarda lo stato di carica della batteria, esso si riduce da un valore iniziale del 65% al valore di circa il 59.5% per questa manovra di accelerazione in puro elettrico, considerando una batteria con capacità di 6.5 [Ah] con le stesse caratteristiche riportate nel modello EVT 1 mode.

Dalle equazioni riportate si evince come la velocità di uscita si esprime come combinazione lineare di EM 2 e ICE, ma è risultata direttamente proporzionale alla velocità della macchina EM 1. Infatti eguagliando le due equazioni si ritrova l'equilibrio delle velocità all'interno PSD, molto simile all'architettura EVT 1 mode studiata precedentemente.

Ottenute le equazioni parametriche si ricerca il punto meccanico per cui l'efficienza del sistema EVT sia massima. Definendo il valore SR come:

$$SR = \frac{\omega_{ICE}}{\omega_{out}} = \frac{1}{a_2} - \frac{a_2}{a_3} \omega_{EM2}$$

Nella condizione di velocità EM 2 nulla si ottiene il valore di SR in corrispondenza del punto meccanico.

$$se \ \omega_{EM2} = 0 \rightarrow SR_{MP} = \frac{1}{a_2} = 1.42553$$

In questa modalità si ottiene solo un punto meccanico in quanto il valore di SR non dipende dalla velocità della macchina EM1.

6.2.2 Analisi Statica

Sono riportate le equazioni che mettono in relazione le coppie dei motori elettrici e termico con la coppia in uscita del EVT.

PSD 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{S2}}{T_{R2}} = \frac{N_{S2}}{N_{R2}} \\ T_{C2} = -T_{R2} \frac{N_{S2} + N_{R2}}{N_{R2}} \\ T_{C2} = -T_{S2} \frac{N_{S2} + N_{R2}}{N_{S2}} \\ T_{S2} = T_{EM2} \\ T_{R2} = T_{ICE} \end{array} \right.$$

PSD 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{S1}}{T_{R1}} = \frac{N_{S1}}{N_{R1}} \\ T_{C1} = -T_{R1} \frac{N_{S1} + N_{R1}}{N_{R1}} \\ T_{C1} = -T_{S1} \frac{N_{S1} + N_{R1}}{N_{S1}} \\ T_{S1} = T_{EM1} \end{array} \right.$$

Le equazioni parametriche sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{EM2} = b_1 T_{ICE} \\ T_{C2} = b_2 T_{ICE} \\ T_{C1} = b_3 T_{EM1} \\ T_{out} = -(T_{C2} + T_{C1}) = -(b_3 T_{EM1} + b_2 T_{ICE}) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} b_1 = \frac{N_{S2}}{N_{R2}} \\ b_2 = -\frac{N_{S2} + N_{R2}}{N_{R2}} \\ b_3 = -\frac{N_{S1} + N_{R1}}{N_{S1}} \end{array} \right.$$

Dalle equazioni della statica si evince che la coppia in uscita T_{out} è combinazione lineare della coppia T_{ICE} e T_{EM1} , invece la T_{EM2} è proporzionale alla coppia del motore termico.

6.2.3 Logica di controllo

L'obiettivo è quello di ottenere in uscita dal controllo le coppie di comando per i motori elettrici e motore termico. Le ipotesi fatte sono:

- La potenza richiesta alle ruote in modo continuativo dovrà essere fornita dal motore termico mediante velocità e coppie presenti sulla E line, per un più basso consumo di combustibile e più alta efficienza del motore termico;
- La coppia da fornire agli altri attuatori dipende dalla coppia fornita al motore termico;
- Si esegue una rampa di accelerazione da 0 a 90 [km/h] con mantenimento della velocità raggiunta.

In Fig. 6.10 è rappresentata la logica di controllo connessa al sistema meccanico precedentemente descritto.

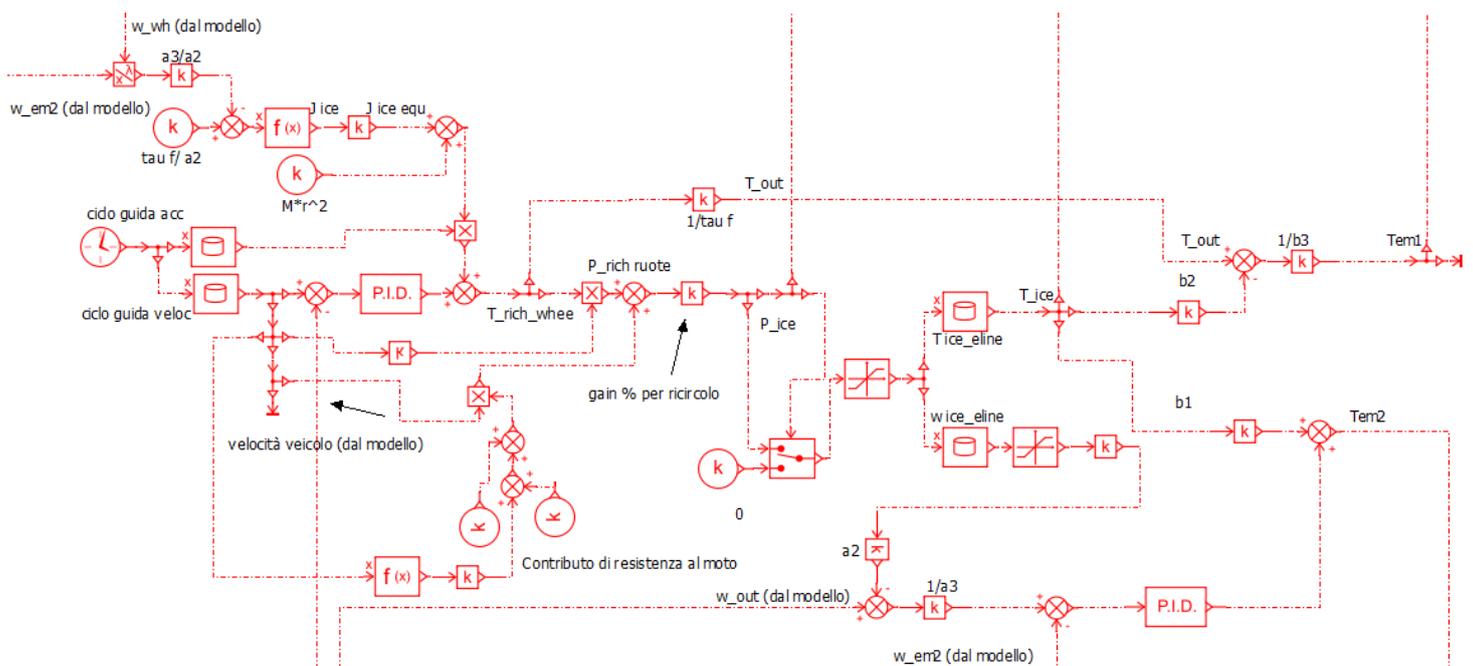


Fig. 6.10: Schema logica di controllo modalit  EVT input split.

Come si evince dallo schema, parte della logica   simile a quella implementata per il funzionamento della modalit  pura elettrica alla quale   stato considerato anche il funzionamento del motore termico ICE. In seguito   riportata la spiegazione della logica effettuata che si basa sulle equazioni determinate dalla cinematica e statica pi  in contributo dinamico.

Vi   anche in questo caso il controllo sulla velocit  di riferimento del veicolo con correzione dell'errore tramite un PID. Ad esso si somma il contributo inerziale, come nel caso precedente a determinare la coppia richiesta alle ruote. Con tale coppia   possibile ricavare la coppia T_{out}

che serve a determinare in seguito la coppia T_{EM1d} nota la coppia T_{ICE} . (Vedere sottocapitolo precedente).

Dalla coppia richiesta alle ruote è possibile ricavare la potenza continuativa richiesta alle ruote P_{WH} . Nota tale potenza si è inserito un gain percentuale che tiene conto della quantità di potenza che bisogna richiedere al motore termico.

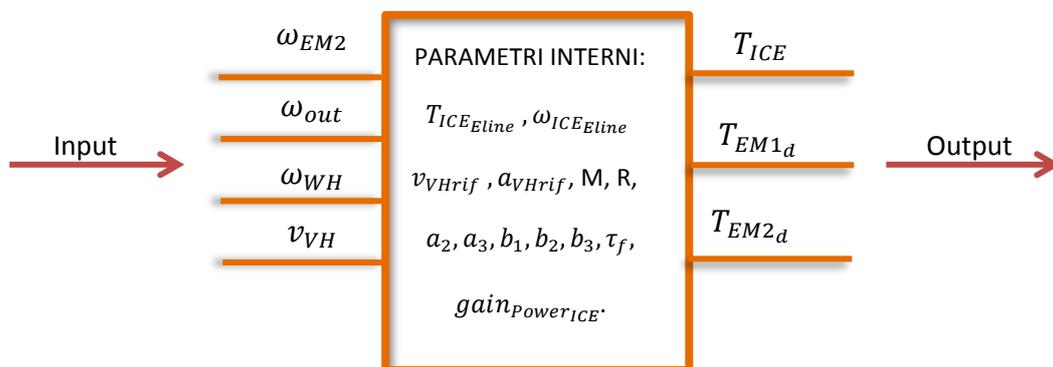
In questo modo si ha la possibilità di variare la potenza richiesta al motore in diverse condizioni. Esso rappresenta un parametro importante e significativo perché inserito in una logica completa, che tiene conto anche della variabile dello stato di carica, permette di scegliere la quota percentuale da impostare in modo da aumentare la potenza richiesta al motore in condizioni di basso SOC oppure permettere di diminuire la potenza richiesta a fronte di alti SOC. Tale parametro sostanzialmente permette di spostare il peso della potenza dal motore termico ai motori elettrici e viceversa. Nel nostro caso si è utilizzato un gain come parametro costante e si sono effettuate diverse simulazioni variando il suo valore.

Determinato il gain da fornire alla potenza richiesta alle ruote si ottiene la potenza richiesta ICE. Attraverso le mappe della curva E line inserite in modo che riportino in ascissa il valore della potenza richiesta e in ordinata il valore della velocità e coppia, si determinano i valori di T_{ICE} e ω_{ICE} .

Il valore di T_{ICE} è utilizzato sia per determinare assieme al valore T_{out} la coppia da fornire al motore EM 1, T_{EM1d} , che per determinare la coppia statica di equilibrio del primo rotismo e del motore EM 2, T_{EM2} .

Per determinare la coppia T_{EM2d} si deve considerare anche il contributo del transitorio attraverso l'utilizzo di un PID che effettua la correzione dell'errore dato dalla differenza della velocità di EM 2 di feed-back, nota la velocità di out del modello e ω_{ICE} e la velocità di EM 2 rilevata dal sensore di velocità. (Vedere sottocapitolo precedente).

Riassumendo la logica di controllo si ottiene lo schema in basso:



6.2.4 Risultati simulazione

Le simulazioni eseguite sono riportati in Tabella 6.2.

	SOC [%]	Gain Power ICE [-]
Simulazione 1 (linee tratteggiate)	40	1.10
Simulazione 2 (linee continue)	65	0.60

Tabella 6.2: Dati delle due diverse simulazioni.

La simulazione 1 è stata eseguita considerando uno stato di carica della batteria al 40 [%] per cui si necessita fin dai primi istanti di funzionamento della ricarica della batteria, per cui non viene eseguita la modalità pura elettrica e il motore termico viene avviato appena dopo pochi secondi. Il gain per il calcolo della potenza da fornire al motore termico è pari ad 1.1 , per cui si richiede una quantità di potenza ICE pari al 10 % maggiore di quella richiesta alle ruote.

E in seguito è stata eseguita una simulazione 2 considerando lo stato di carica della batteria al 65 [%], in questo caso lo stato di carica della batteria è sufficientemente alto e non necessita di ricarica, si vuole mantenere il valore di SOC circa costante nel tempo. Di conseguenza si riduce il gain per il calcolo della potenza da fornire al motore termico al valore di 0.60 , dunque in un primo tratto la potenza ICE viene utilizzata per colmare la potenza richiesta alle ruote e per rigenerare potenza che viene subito riutilizzata dal motore EM 2 senza passare per la batteria per cui SOC resta circa costante, mentre quando la richiesta di potenza diviene elevata, ad esempio dopo i 100 [s] si fa in modo che solo una parte della potenza richiesta alle ruote sia soddisfatta dal motore termico e il resto della potenza sarà fornita dalle macchine elettriche attingendo dalla batteria, quindi SOC decresce.

In Fig. 6.11 è riportata l'analisi di inseguimento della velocità di riferimento veicolo, si evince che il veicolo insegue correttamente la velocità imposta per entrambe le simulazioni.

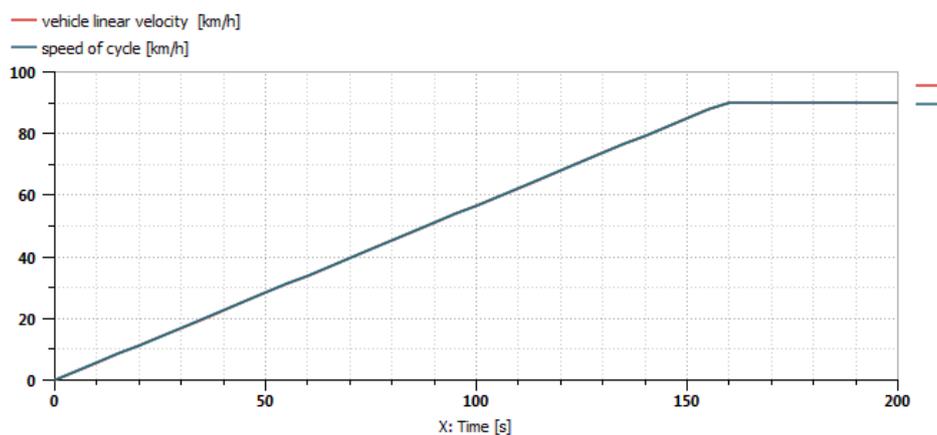


Fig. 6.11: Analisi inseguimento velocità di riferimento.

In Fig. 6.12 si nota come la velocità ICE segue correttamente la velocità di riferimento, a prova del buon controllo effettuato

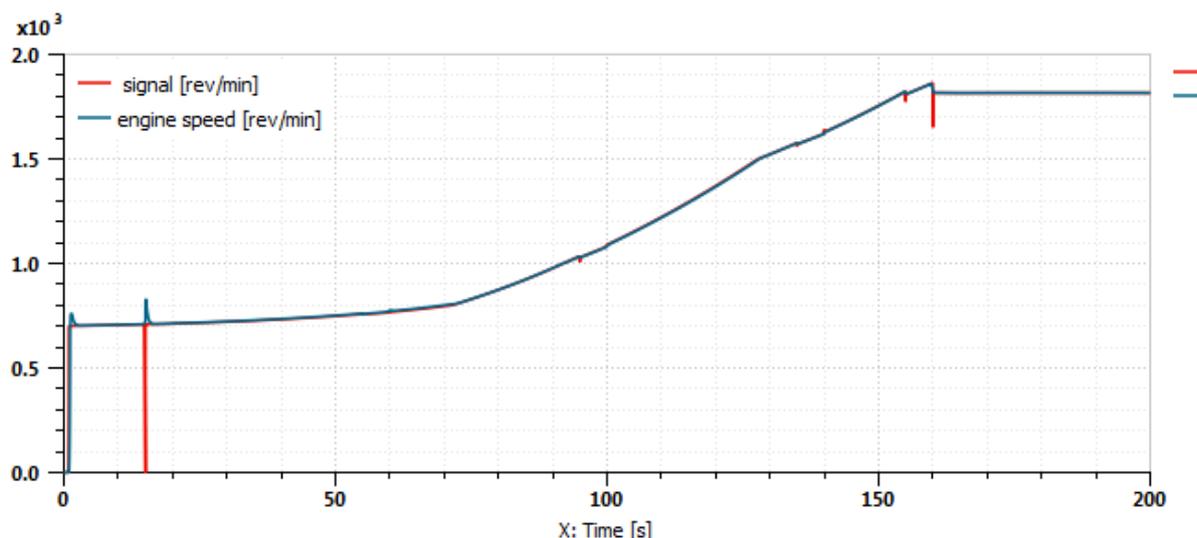


Fig. 6.12: Analisi inseguimento della velocità di riferimento ICE.

Gli andamenti delle velocità del solare (EM 2), corona (ICE) e del portatreno (out) del PSD 2 sono riportati in Fig. 6.13. Le curve tratteggiate si riferiscono alla simulazione 1 mentre le curve continue alla simulazione 2.

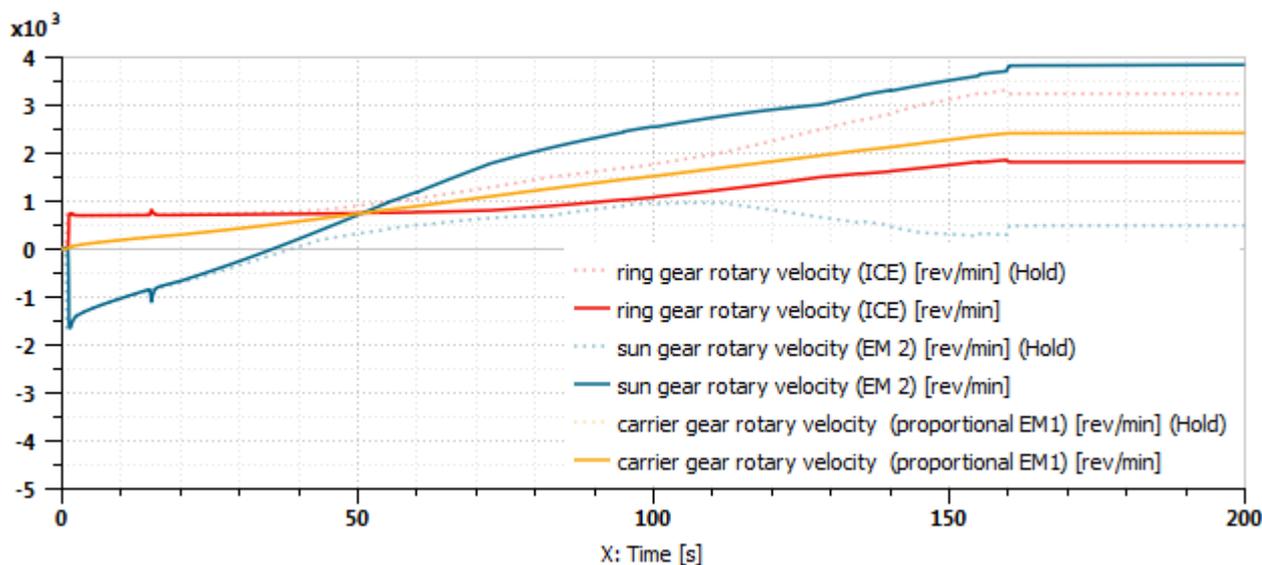


Fig. 6.13: Andamento velocità in PSD 2, linea tratt. SIM 1, linea cont. SIM 2.

Si nota un primo e breve tratto in cui il motore termico è spento, avviene in seguito la sua accensione, si ha l'inversione della velocità del motore EM 2 il quale ha il ruolo di regolare la velocità ICE. Nella simulazione 1 (linea tratteggiata) la velocità ICE risulta essere sempre più alta rispetto alla velocità EM 2 data la richiesta più alta di potenza al motore termico. Nella simulazione 2, la richiesta di potenza ICE è più bassa, si evidenzia una intersezione delle curve velocità ICE e velocità EM 2 al secondo 50, portando la velocità ICE a valori più bassi rispetto alla simulazione 1 per di rispettare la condizione dei punti di funzionamento sulla curva E line, inserita nella logica di controllo. La velocità EM 2 si adatta per via del rotismo epicicloidale PSD 2 alla velocità ICE in modo che la velocità EM 1 sia mantenuta la diretta proporzionalità con la velocità di uscita EVT e quindi la velocità delle ruote.

Per quanto riguarda l'andamento delle coppie, la simulazione 1 in vista della più alta potenza richiesta al motore termico, presenta delle coppie ICE più alte rispetto alla simulazione 2, di conseguenza data la diretta proporzionalità anche la coppia EM 2, positiva, si comporta nel medesimo modo. La coppia EM 1 invece ha un tratto iniziale positivo, molto piccolo, in corrispondenza dell'avviamento del veicolo in cui il motore termico è spento, subito dopo la sua coppia diviene negativa, permettendo di ottenere potenza negativa e quindi sviluppo di energia elettrica, come vedremo nell'analisi sulle potenze. La coppia EM 1 della simulazione 1 è più bassa della stessa coppia nella simulazione 2, ovvero ha un andamento ancora più decrescente a prova del fatto che si ha una potenza negativa più alta, una maggiore generazione di potenza elettrica che andrà ad alimentare il motore EM 2 e rigenerare la batteria.

Passiamo ora ad esaminare l'andamento delle potenze sviluppate dai tre motori, potenza della batteria e potenza alle ruote. La Fig. 6.14 mostra l'andamento della potenza sviluppata dal motore ICE per le due simulazioni. La simulazione 1 per via di un gain di potenza ICE maggiore rispetto alla simulazione 2 presenta un quantità di potenza ICE maggiore a conferma di quanto detto.

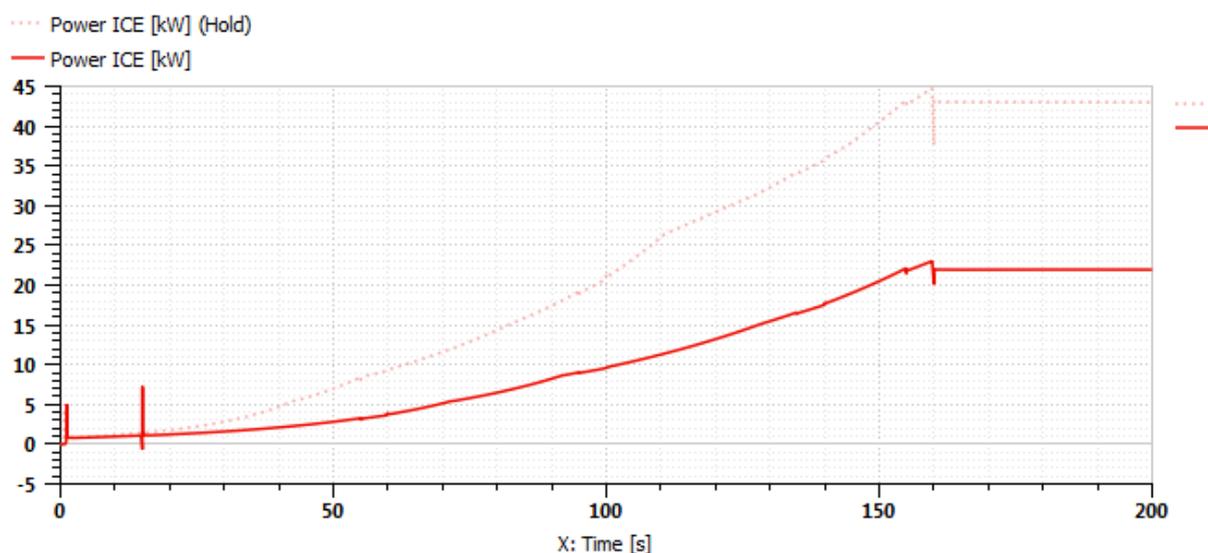


Fig. 6.14: Andamento della potenza ICE, linea tratt. SIM 1, linea cont. SIM 2.

La Fig. 6.15 e Fig. 6.16 descrivono rispettivamente l'andamento della potenza EM 2 ed EM 1. Per quanto riguarda l'andamento delle potenze dei due motori elettrici, il motore EM 1 sviluppa potenza negativa e quindi secondo la convenzione adottata è responsabile del ricircolo di potenza interno e di rigenerazione della potenza (a conferma di quanto rilevato nell'architettura precedente EVT 1 mode), mentre il motore EM 2 eroga potenza positiva e assiste ICE nella trazione del veicolo.

Analizzando l'andamento della potenza di EM 1 si evince che nella simulazione 1 la potenza negativa è maggiore rispetto alla simulazione 2. Questo implica che il motore EM 1 nel primo caso sta rigenerando una quota maggiore di energia elettrica in concomitanza della richiesta maggiore di potenza ICE, dato il bisogno di ricarica della batteria.

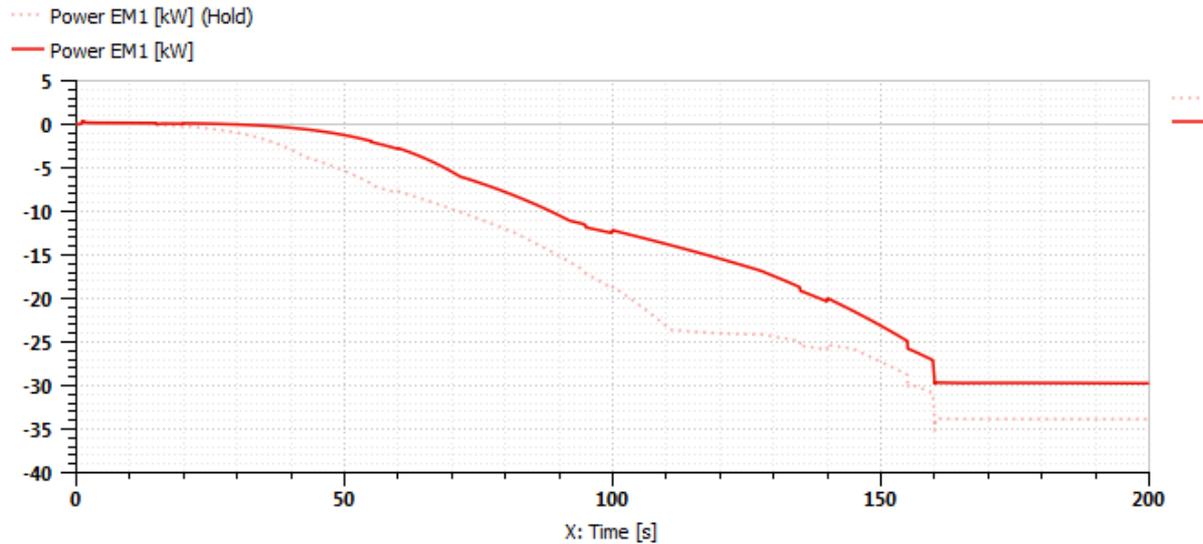


Fig. 6.15: Andamento della potenza EM 1, linea tratt. SIM 1, linea cont. SIM 2.

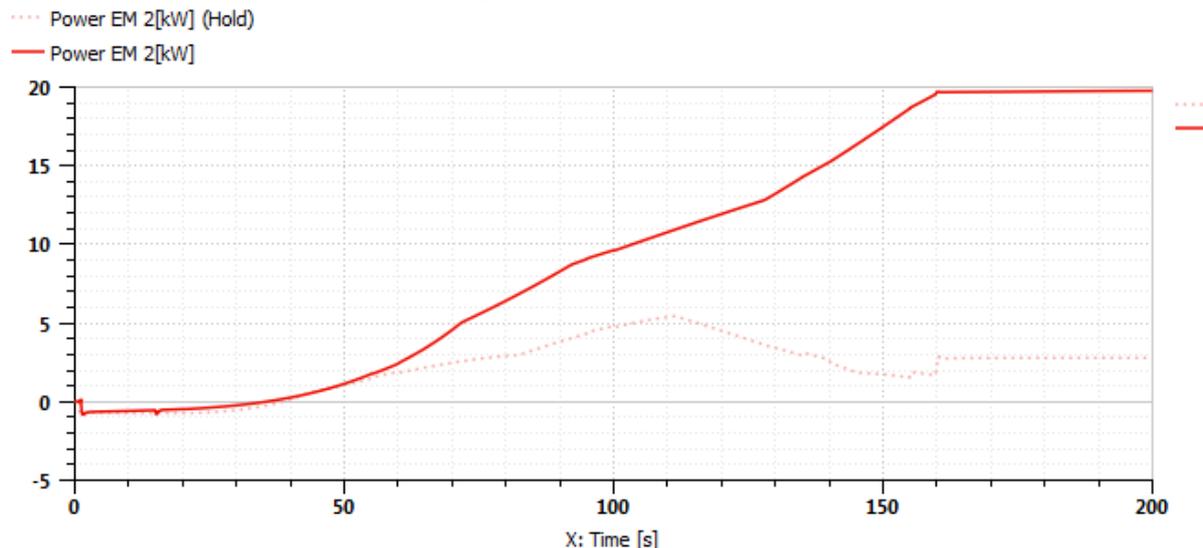


Fig. 6.16: Andamento della potenza EM 2, linea tratt. SIM 1, linea cont. SIM 2.

Dall'andamento della potenza di EM 2 si evince come nella simulazione 1 viene erogata meno potenza destinata alla trazione della simulazione 2.

Per rilevare la quantità di potenza ICE che viene effettivamente convertita e quella destinata alla trazione del veicolo si riporta prima Fig. 6.17 che mostra l'andamento della potenza richiesta alle ruote per la trazione e in seguito la percentuale calcolata della potenza ICE che viene destinata per la produzione di potenza elettrica utilizzata o per il ricircolo di potenza verso il EM 2 oppure verso la batteria, Fig. 6.18 .

Si può notare che di tutta la potenza erogata dal motore termico, nella prima simulazione circa in 65-70% (escluso i primi 10 s) sono destinati alla conversione in potenza elettrica, e la restante parte destinata effettivamente alla trazione. Nella simulazione 2 tale percentuale si mantiene circa intorno al 40 % quindi si ha una quota maggiore di potenza che viene destinata alla trazione.

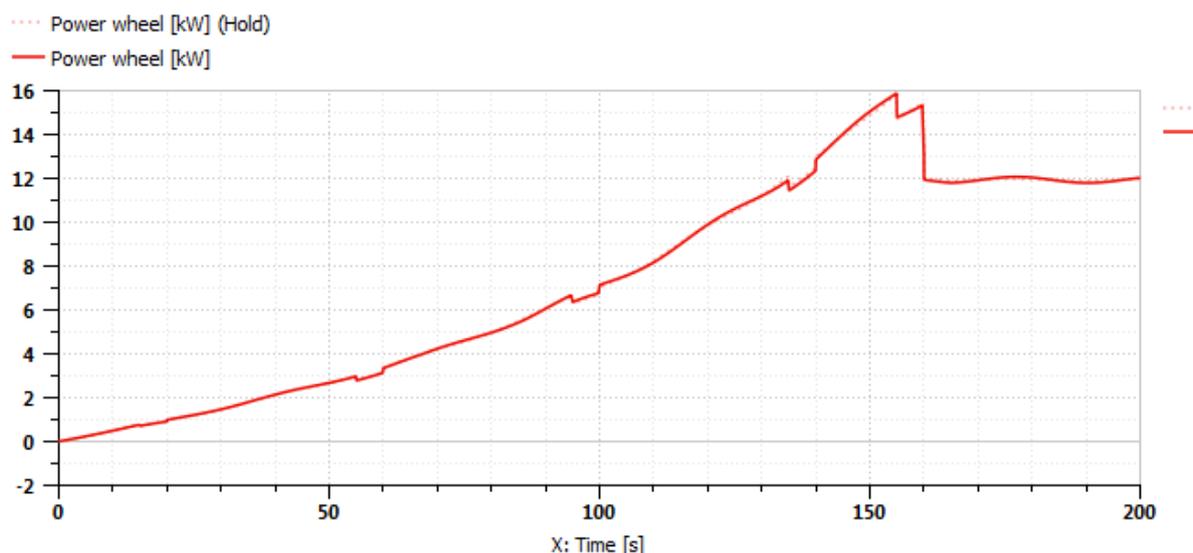


Fig. 6.17: Andamento potenza richiesta alle ruote.

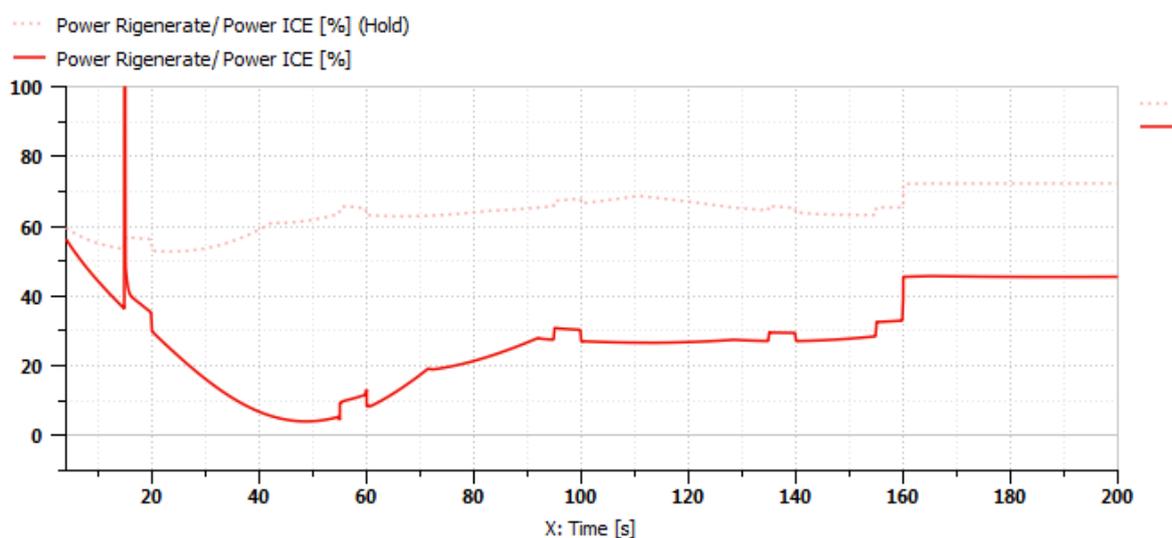


Fig. 6.18: Andamento percentuale della potenza ICE effettivamente rigenerata, linea tratt. SIM 1, linea cont. SIM 2.

Per analizzare la quota di potenza che viene utilizzata per la rigenerazione della batteria e quella destinata direttamente alla alimentazione del motore EM 2 , riportiamo l'andamento della potenza della batteria in Fig. 6.20 .

Nella simulazione 1 si nota una ricarica della batteria notevole, per cui la quota di potenza elettrica prodotta dal motore EM 1 viene destinata in modo maggiore alla ricarica della batteria che alla alimentazione del motore EM 2 . Infatti se si analizza anche la Fig. 6.21 , in cui è riportato l'andamento dello stato di carica, si ha un incremento di SOC dal 40 [%] iniziale ad un valore finale dell'intera manovra di circa 67 [%]. Considerando la simulazione 2, invece la potenza della batteria ha un andamento oscillatorio attorno allo 0 fino a 100 [s], quindi tutta la potenza convertita dal motore EM 1 serve per alimentare il motore EM 2 . Nel restante arco temporale invece la potenza della batteria è positiva, non si ha rigenerazione per cui, la quota di potenza convertita dal motore EM 1 è destinata al motore EM 2 , il quale richiede anche una certa potenza dalla batteria, la quale non supera i 2 [kW]. Detto questo lo

stato di carica della batteria resta circa costante attorno al valore del 65 [%] con una lieve diminuzione nella parte finale fino al valore di 64 [%].

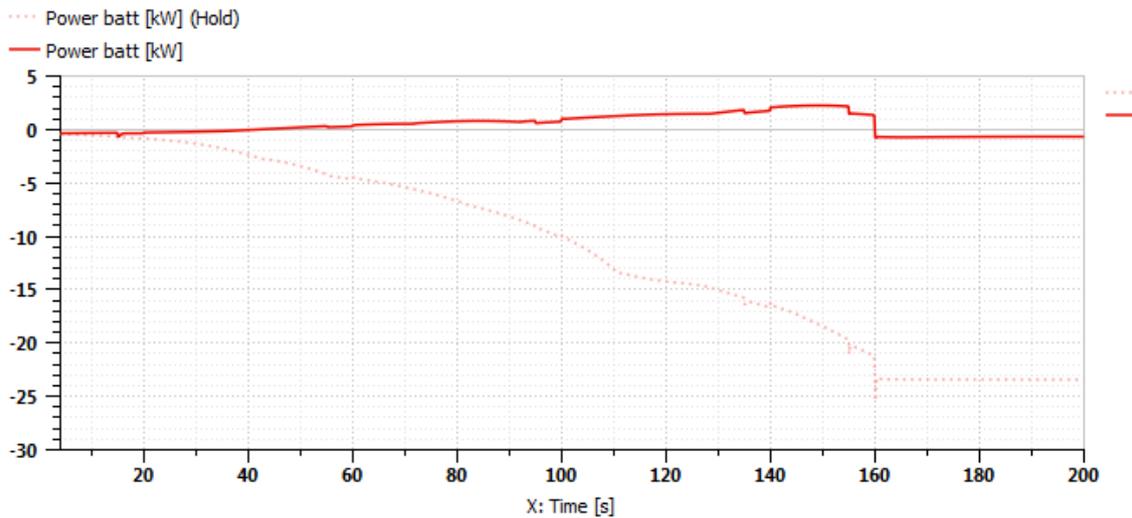


Fig. 6.19: Andamento della potenza della batteria, linea tratt. SIM 1, linea cont. SIM 2.

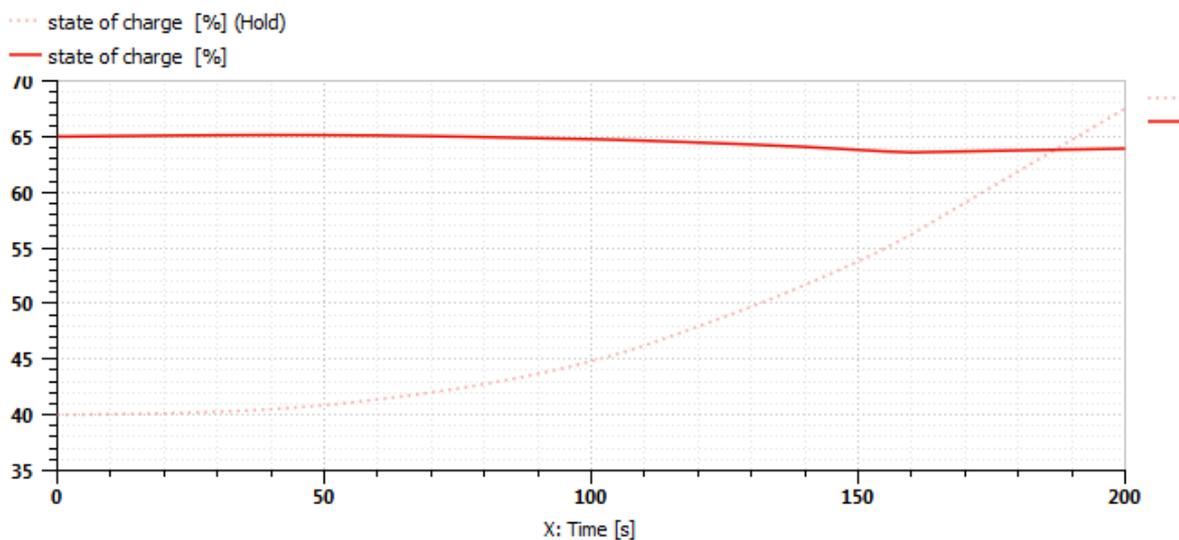


Fig. 6.20: Andamento SOC, linea tratt. SIM 1, linea cont. SIM 2.

Dopo aver analizzato l'andamento delle potenze, si passa a descrivere il PR e l'efficienza del sistema EVT in funzione del parametro SR.

In Fig. 6.21 è riportato l'andamento del PR in funzione del SR, in queste condizioni si nota che PR è pari a 0 in corrispondenza di $SR = 1.425$, nel punto meccanico, come evidenziato. Il percorso della potenza elettromeccanica rappresentato da PR positivo ha un PR massimo è uguale per le due simulazioni.

Tale PR è stato calcolato considerando solo la potenza elettromeccanica della macchina EM 2 per cui il risultato è ritenuto accettabile, non tiene conto della potenza rigenerata dal motore EM 1. Il percorso chiuso in cui il motore EM 2 eroga potenza positiva ha un comportamento differente per le due simulazioni, infatti nella simulazione 2 si ha una quota di PR in valore assoluto maggiore della simulazione 1 a constatare il maggior utilizzo di EM 2 come motore elettrico.

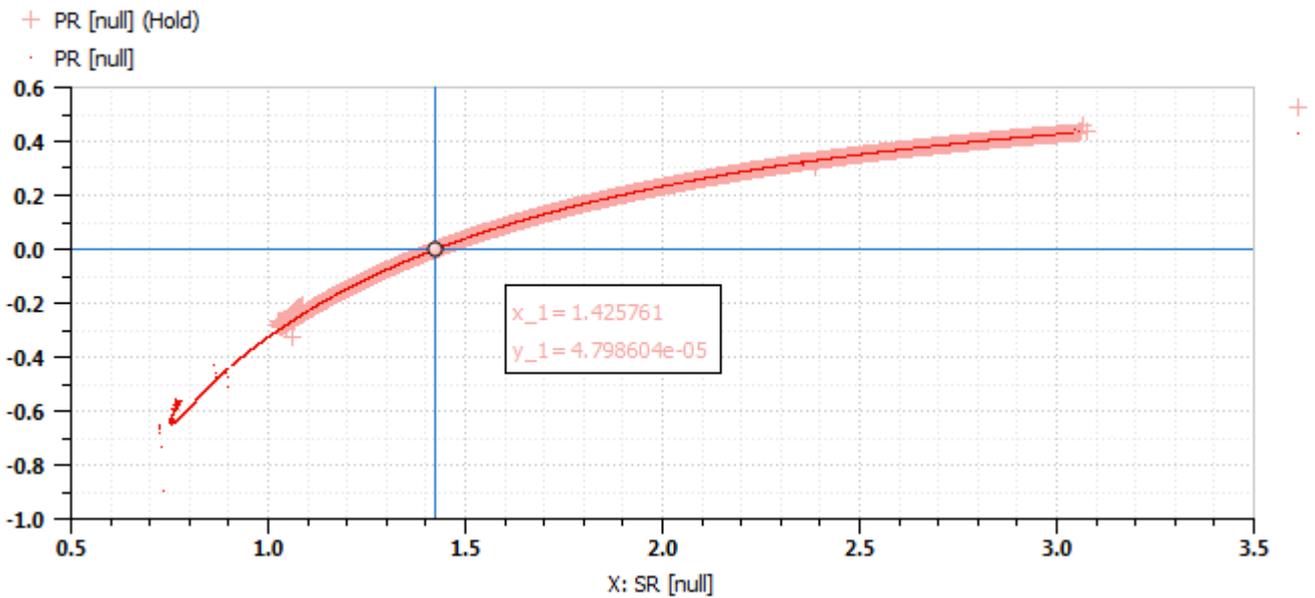


Fig. 6.21: Andamento PR in funzione SR, linea chiara SIM 2, linea sottile SIM 1.

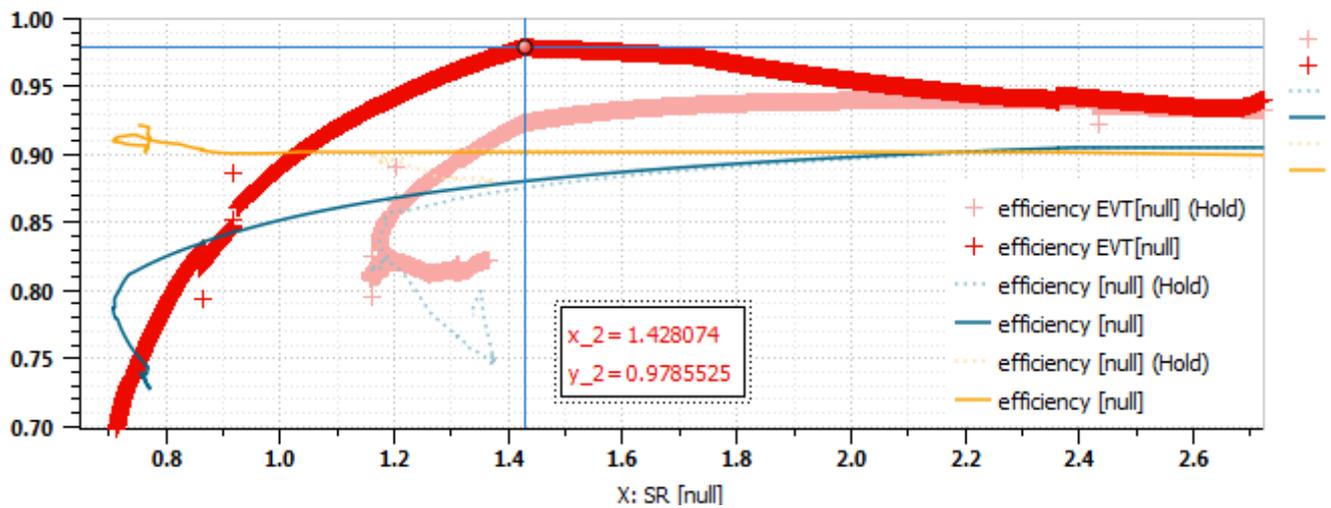


Fig. 6.22: Andamento efficienza EVT ed efficienza delle due macchine elettriche, per entrambe le simulazioni.

In Fig. 6.22 è riportato l'andamento della efficienza EVT e l'andamento dell'efficienza delle due macchine elettriche per le due distinte simulazioni in funzione di SR.

Ricordiamo l'equazione dell'efficienza del sistema EVT:

$$\eta_{EVT} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out\ EVT} + P_{batt\ in}}{P_{ICE} + P_{batt\ out}} \quad \begin{cases} P_{batt\ out} = P_{batt} & \text{se } P_{batt} \geq 0 \\ P_{batt\ in} = P_{batt} & \text{se } P_{batt} \leq 0 \end{cases}$$

Per entrambe le due simulazioni la potenza in uscita dal sistema EVT è costante, quello che cambia sono i contributi della potenza della batteria e potenza ICE. Nella simulazione 1 si ha una maggiore richiesta di potenza ICE dato il guadagno gain pari a 1.2, la potenza batteria in uscita nulla e potenza in entrata dalla batteria è consistente per effettuare la ricarica. Nella

simulazione 2, rispetto al caso precedente la potenza ICE richiesta è più bassa, la potenza in uscita dalla batteria, Fig. 6.18, non è sempre nulla e la potenza in entrata dalla batteria è molto bassa. Per cui diremo che la differenza di efficienza nelle due simulazioni dipende dai flussi di potenza convertiti dalle macchine elettriche conseguiti da una maggiore quota di potenza richiesta dal motore termico. Inoltre il rendimento del motore termico non è considerato (è fuori dal volume di controllo) quindi aumentare la potenza richiesta al motore non è di per se un problema dal punto di vista della sua efficienza. In modo particolare si è potuto constatare dagli andamenti delle efficienze delle macchine elettriche sovrapposte, che nella simulazione 2 si ha una migliore efficienza della macchina EM 2 e della macchina EM 1, anche se meno marcata. Questo significa che le macchine elettriche lavorano in punti di funzionamento ad più alta efficienza come si evince in Fig. 6.23 e Fig. 6.24. Nei due punti meccanici in cui la potenza del motore EM 2 è nulla non possiamo dire lo stesso della potenza del motore EM 1. Analizziamo cosa succede a livello del punto meccanico al secondo 33.84 delle due simulazioni; per il primo caso la potenza ICE è maggiore della potenza in uscita per cui parte di questa viene rigenerata dal motore EM 1, nel secondo caso invece la potenza ICE è più bassa e circa uguale alla potenza in uscita e dunque non si ha rigenerazione.

Di conseguenza in corrispondenza del punto meccanico si ha una maggiore efficienza EVT nella simulazione 2 che nella simulazione 1. Il tratto a efficienza costante della simulazione 1 è dovuta al fatto che in quella condizione si ha un equilibrio tra potenza in entrata e uscita dalla batteria che annulla il contributo e la potenza ICE e quella in uscita sono circa uguali. Valori di efficienza migliori per SR maggiori del punto meccanico, per la simulazione 1, è dovuta al fatto che la potenza EM 2 subito dopo del punto meccanico diviene leggermente maggiore della potenza EM 2 nella seconda simulazione Fig. 6.16 , per poi invertire il ruolo.

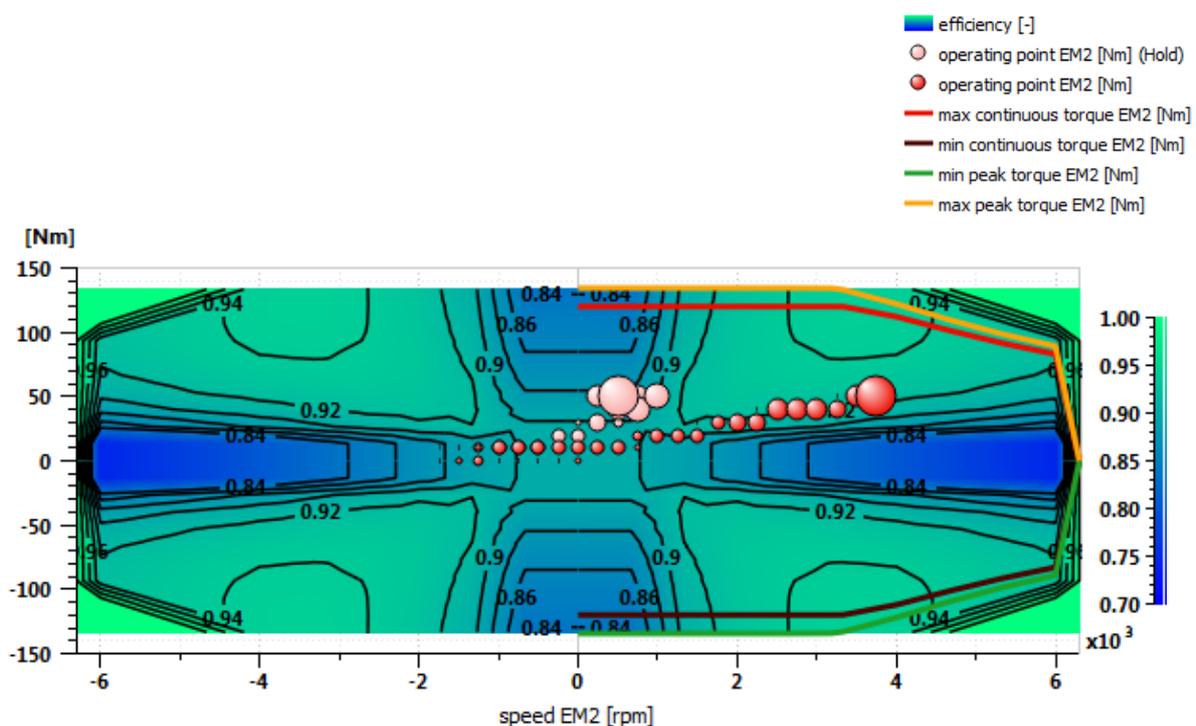


Fig. 6.23: Punti di funzionamento EM 2, per entrambe le simulazioni.

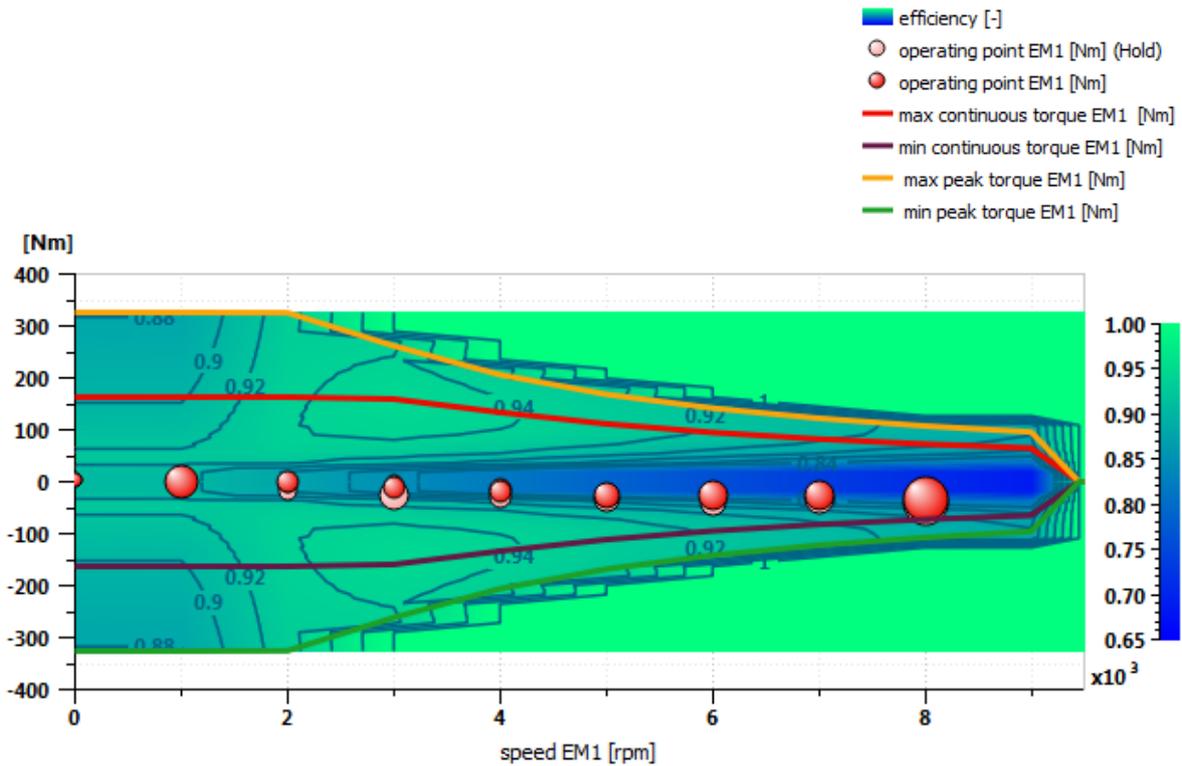


Fig. 6.24: Punti di funzionamento EM1, per entrambe le simulazioni.

Riportiamo la caratteristica di coppia del motore termico in Fig. 6.25 per constatare che in entrambe le simulazioni sono rispettate le condizioni, inserite nella logica di controllo, di rispetto della E line. In entrambi i casi si ha un funzionamento con maggior densità, pallino più grande, nella zona a più basso consumo e maggiore rendimento del motore termico.

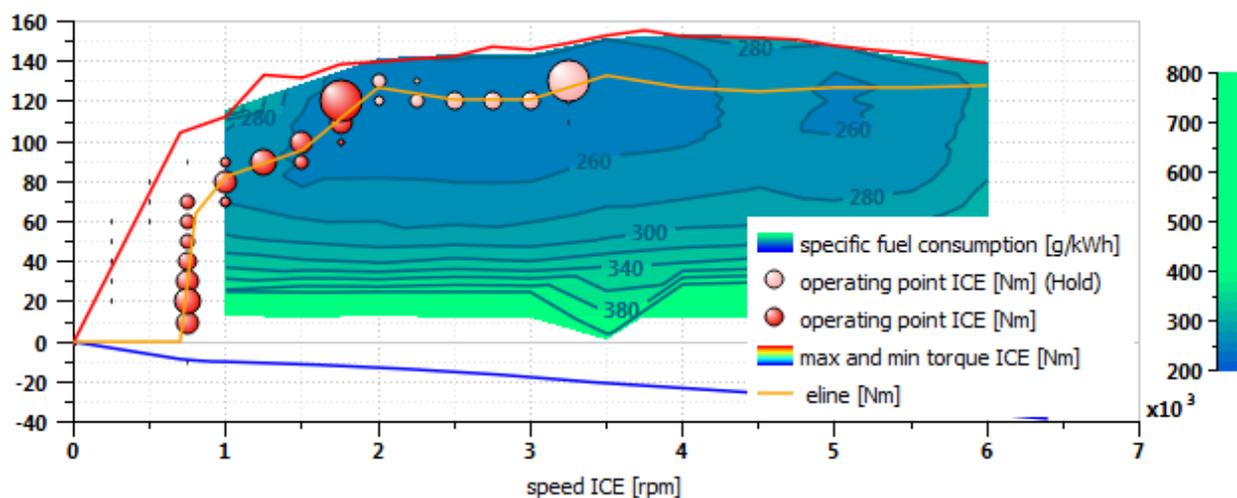


Fig. 6.25: Punti di funzionamento ICE, per entrambe le simulazioni.

Come nella simulazione a modalità pura elettrica anche in questo caso i motori elettrici sono sovradimensionati per cui per un risparmio in termini di costi e peso della vettura si potrebbe pensare di inserire delle macchine con taglie più basse, considerando che le prove sono ad accelerazioni molto basse e in condizioni di un transitorio le coppie richieste ai motori sarebbero più alte.

6.3 Modalità Compound Split

Per poter selezionare la modalità compound split la frizione CL1 è aperta mentre la CL2 che connette i due planetari è chiusa, per cui R1 non ha velocità nulla ma pari alla velocità di S2. In questo modo si ottiene un doppio split di potenza a monte e valle, un input split combinato ad un output split. In Fig. 6.26 è riportato lo schema del volume di controllo considerato.

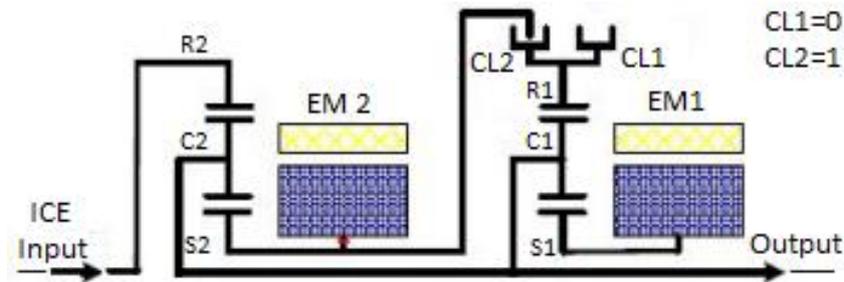


Fig. 6.26: Schema volume di controllo EVT in modalità compound split.

6.3.1 Analisi cinematica

Applicando la formula di Willis ai due rotismi epicicloidali e applicando le condizioni al contorno si è trovata l'equazione parametrica che lega la velocità di uscita EVT con la velocità dei motori elettrici e termico.

PSD 2:

$$\begin{cases} \frac{\omega_{R2} - \omega_{C2}}{\omega_{S2} - \omega_{C2}} = -\rho_2 \\ \omega_{C2} = \omega_{out} \\ \omega_{R2} = \omega_{in} = \omega_{ICE} \\ \omega_{S2} = \omega_{EM2} \end{cases}$$

PSD 1:

$$\begin{cases} \frac{\omega_{R1} - \omega_{C1}}{\omega_{S1} - \omega_{C1}} = -\rho_1 \\ \omega_{C1} = \omega_{C2} = \omega_{out} \\ \omega_{R1} = \omega_{S2} \\ \omega_{S1} = \omega_{EM1} \end{cases}$$

Equazione parametrica:

$$\begin{cases} \omega_{out} = a_2 \omega_{ICE} + a_3 \omega_{EM2} \\ \omega_{out} = a_4 \omega_{EM2} + a_5 \omega_{EM1} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = \frac{1}{1 + \frac{N_{S2}}{N_{R2}}} \\ a_3 = \frac{\frac{N_{S2}}{N_{R2}}}{1 + \frac{N_{S2}}{N_{R2}}} \\ a_4 = \frac{1}{1 + \frac{N_{S1}}{N_{R1}}} \\ a_5 = \frac{\frac{N_{S1}}{N_{R1}}}{1 + \frac{N_{S1}}{N_{R1}}} \end{cases}$$

A differenza del caso precedente, modalità input split, la velocità di uscita nel PSD 1 dipende sia dal EM 1 ma anche dalla velocità di EM 2. In questo caso dato al diversa dipendenza della velocità di uscita da entrambe le due macchine elettriche è possibile ricavare due punti meccanici.

Il primo punto meccanico si ricava ponendo la velocità della macchina EM 2 pari a 0 per cui si ottiene il medesimo punto meccanico ricavato nella modalità input split, e un secondo punto meccanico ricavato ponendo la velocità EM 1 pari a 0:

$$SR = \frac{\omega_{ICE}}{\omega_{out}} = \frac{1}{a_2} \left(1 - \frac{a_3}{a_4} \left(1 - a_5 \frac{\omega_{EM1}}{\omega_{out}} \right) \right)$$

$$se \ \omega_{EM1} = 0 \rightarrow SR_{MP} = \frac{1}{a_2} \left(1 - \frac{a_3}{a_4} \right) = 0.8189$$

Quindi ricapitolando in Tabella 6.3 sono riportati i due punti meccanici ottenuti.

	1° Punto meccanico $\omega_{EM2} = 0$	2° Punto meccanico $\omega_{EM1} = 0$
SR_{MP}	1.425	0.818

Tabella 6.3: Punti meccanici Compound Split.

6.3.2 Analisi statica

Sono riportate le equazioni che mettono il relazione le coppie dei motori elettrici e termico con la coppia in uscita del EVT.

PSD 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{S2}}{T_{R2}} = \frac{N_{S2}}{N_{R2}} \\ T_{C2} = -T_{R2} \frac{N_{S2} + N_{R2}}{N_{R2}} \\ T_{C2} = -T_{S2} \frac{N_{S2} + N_{R2}}{N_{S2}} \\ T_{S2} = T_{EM2} - T_{R1} \\ T_{R2} = T_{ICE} \end{array} \right.$$

PSD 1:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_{S1}}{T_{R1}} = \frac{N_{S1}}{N_{R1}} \\ T_{C1} = -T_{R1} \frac{N_{S1} + N_{R1}}{N_{R1}} \\ T_{C1} = -T_{S1} \frac{N_{S1} + N_{R1}}{N_{S1}} \\ T_{S1} = T_{EM1} \\ T_{R1} = T_{EM2} - T_{S2} \end{array} \right.$$

Le equazioni parametriche sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{EM2} = b_1 T_{ICE} + \frac{T_{EM1}}{b_4} \\ T_{C2} = b_2 T_{ICE} \\ T_{C1} = b_3 T_{EM1} \\ T_{out} = -(T_{C1} + T_{C2}) = -(b_3 T_{EM1} + b_2 T_{ICE}) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} b_1 = \frac{N_{S2}}{N_{R2}} \\ b_2 = -\frac{N_{S2} + N_{R2}}{N_{R2}} \\ b_3 = -\frac{N_{S1} + N_{R1}}{N_{S1}} \\ b_4 = \frac{N_{S1}}{N_{R1}} \end{array} \right.$$

6.3.3 Logica di controllo

Anche in questo caso è stata creata una logica di controllo da aggiungere al sistema meccanico definito. Il parte del controllo è simile a quello già esposto per la modalità input split con la differenza dell'introduzione della dipendenza della velocità EM 1 dalla velocità EM 2 e che la coppia EM2 dipende sia dalla coppia ICE che dalla coppia dal motore EM1.

In Fig. 6.27 è riportato uno schema della logica di controllo.

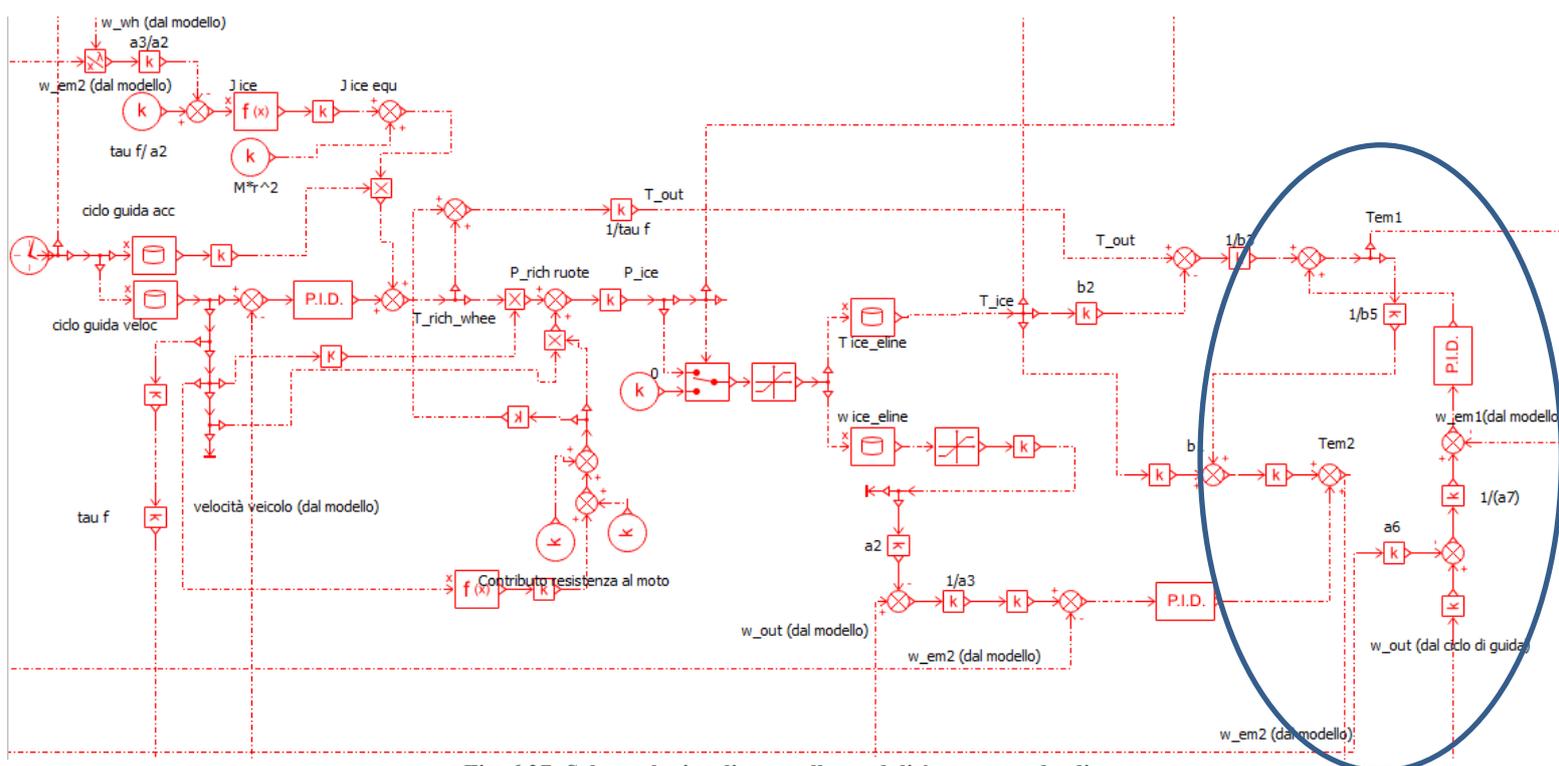


Fig. 6.27: Schema logica di controllo modalità compound split.

È evidenziato la parte aggiunta in cui la coppia di comando del motore EM 1 dovrà avere un contributo che tiene conto della correzione mediante inserimento di un PID, dell'errore dato dalla differenza della velocità EM 1 di riferimento e quella rilevata dal sensore di velocità. Infatti la coppia da fornire al motore EM 1 sarà data da:

$$T_{EM1d} = \frac{T_{out} - T_{ICE} b_2}{b_3} + PID(\omega_{rifEM1}, \omega_{EM1})$$

La coppia da fornire al motore EM2 ha sempre un contributo statico più un contributo dovuto all'inserimento di un controllore PID che corregge l'errore dato dalla differenza delle velocità di riferimento EM2 e velocità rilevata dal sensore.

$$T_{EM2d} = b_1 T_{ICE} + \frac{T_{EM1}}{b_4} + PID(\omega_{rifEM2}, \omega_{EM2})$$

Il resto della logica rimane uguale alla precedente, per maggiori informazioni vedere la logica di controllo della modalità input split.

Per effettuare la simulazione si sono dovuti tarare contemporaneamente 3 PID presenti nella logica di controllo, per cui non stato possibile effettuare un inseguimento molto preciso sulla velocità di riferimento veicolo e la velocità di riferimento dei vari motori.

Per questo motivo il controllo del sistema richiede di essere messo ulteriormente a punto e potrebbe essere la partenza per un ulteriore lavoro di tesi.

Nonostante questo, sono stati ottenuti dei risultati accettabili per effettuare considerazioni da sul comportamento dei vari componenti.

6.3.4 Risultati simulazione

La simulazione è stata eseguita considerando:

- Il cambio della modalità è già avvenuto in precedenza portando la velocità di EM2 a 0;
- Partendo da una velocità iniziale veicolo pari a 100 [km/h] e fino al raggiungimento della velocità di 130 [km/h];
- Stato di carica della batteria iniziale pari al 65 [%];
- Gain sulla potenza ICE unitario;
- Punti di funzionamento ICE sulla E line.

In Fig. 6.28 e Fig. 6.29 sono riportate le velocità nei rispettivi due PSD 1 e PSD 2.

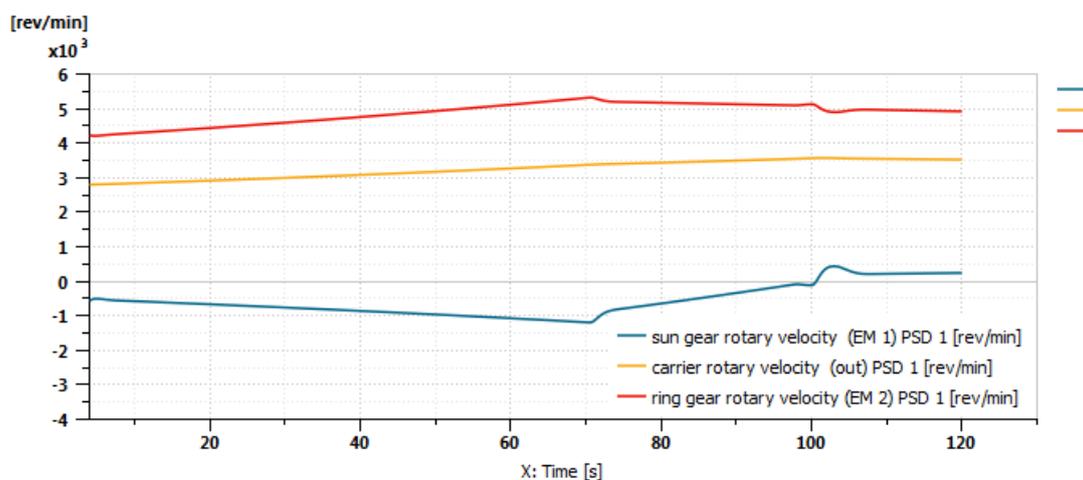


Fig. 6.28: Andamento delle velocità in PSD 1.

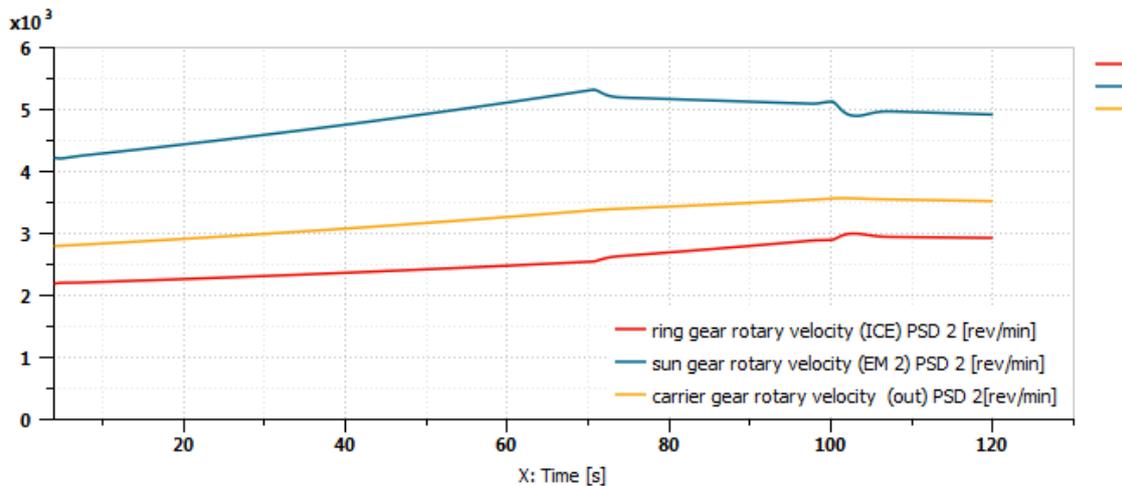


Fig. 6.29: Andamento della velocità in PSD 2.

L'andamento delle velocità verifica le equazioni cinematiche del sistema EVT descritte nell'analisi cinematica. In Fig. 6.28 si ha l'annullamento della velocità EM 1 per cui in tale punto si avrà la presenza del punto meccanico.

Analizziamo ora l'andamento della potenza di vari motori. In Fig. 6.30 è riportato l'andamento della potenza ICE, che risulta avere un andamento crescente nel tempo. Parte di questa potenza sarà destinata alla trazione e parte sarà ricircolata.

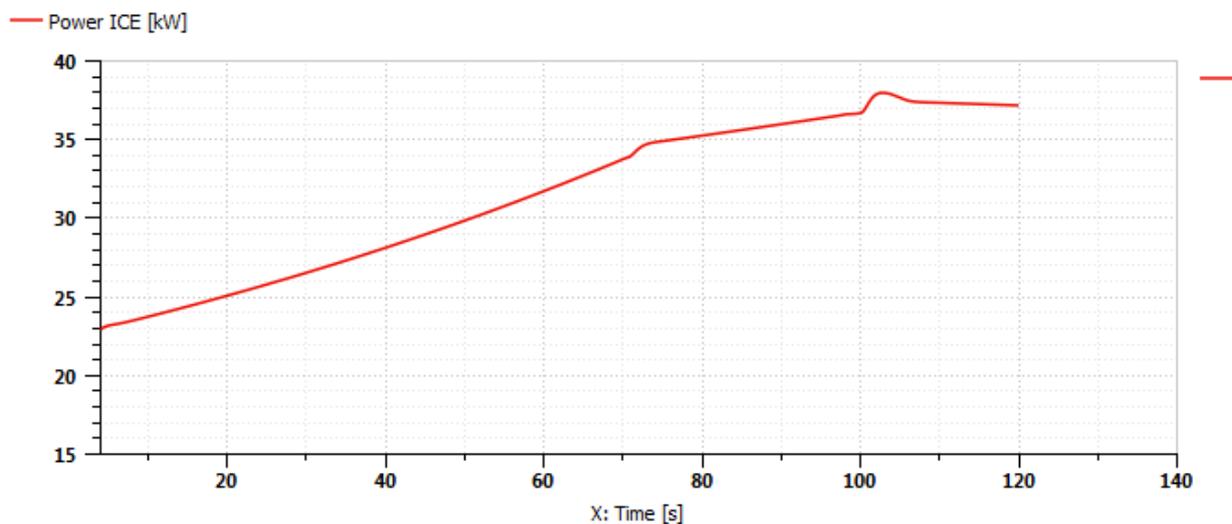


Fig. 6.30: Andamento potenza ICE.

L'andamento della potenza EM 2 in Fig. 6.31, mostra che tale motore è responsabile del ricircolo interno della potenza quindi della conversione di parte della potenza ICE in potenza elettrica che verrà utilizzata per alimentare il motore EM 1 e parte per rigenerare la batteria. Tale potenza rigenerata è di circa 5 [kW].

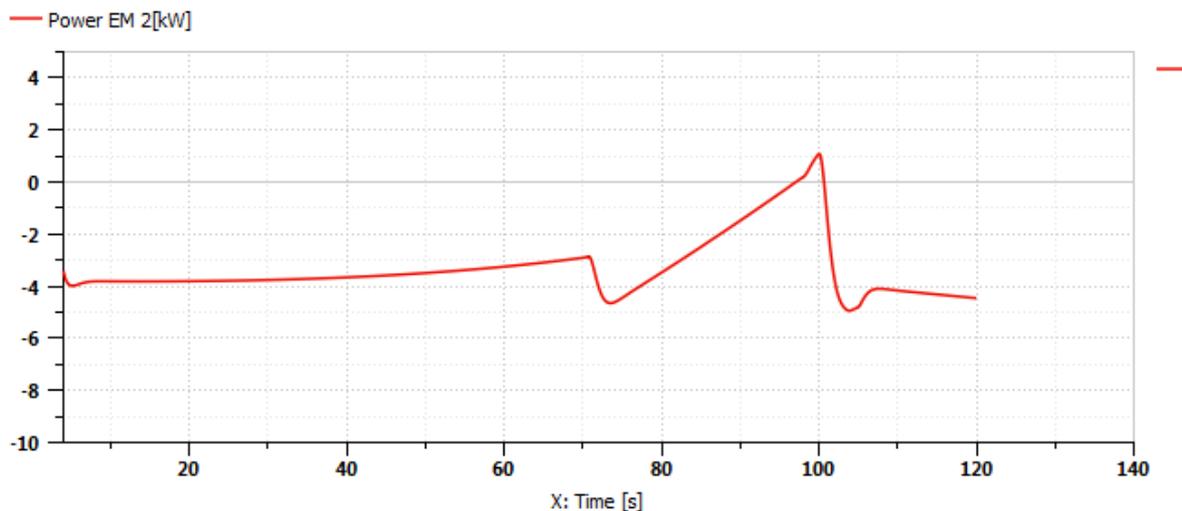


Fig. 6.31: Andamento della potenza EM 2.

In Fig. 6.2 si evince che il motore EM 1 invece eroga potenza positiva e quindi assieme al motore ICE è responsabile della trazione del veicolo. Il funzionamento per le due macchine è diverso dalla modalità input split in quanto in questo caso si ha un funzionamento di EM 1 come motore mentre EM 2 funziona da generatore.

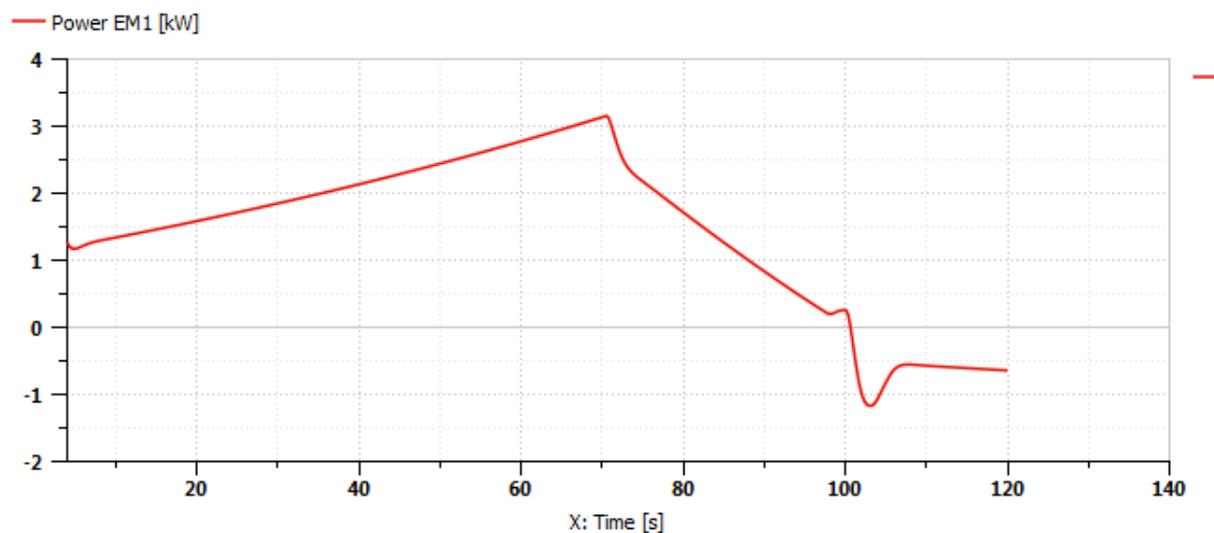


Fig. 6.32: Andamento della potenza EM 1.

L'andamento della potenza della batteria è riportato in Fig. 6.33, esso oscilla attorno lo 0 durante tutta la fase di accelerazione, si ha un primo tratto in cui la batteria viene rigenerata poi si ha potenza erogata positiva che assieme alla potenza convertita da EM 2 alimenta il motore EM 1. In seguito si ha il tratto finale in cui si mantiene la velocità raggiunta dei 130 [km/h] in cui il motore ICE continua ad erogare una potenza più alta di quella richiesta alle ruote per cui entrambi i motori EM 1 ed EM 2 rigenerano la batteria. Di conseguenza l'andamento dello stato di carica si mantiene attorno al valore iniziale del 65 [%] per poi aumentare in seguito, per i motivi descritti. Esso ha un andamento proporzionale e simmetrico rispetto all'asse delle ascisse alla potenza erogata dalla batteria. Una miglioria che si potrebbe

apportare alla logica di controllo, anche in questo caso, sarebbe quella di far variare il gain di potenza in funzione dello stato di carica della batteria.

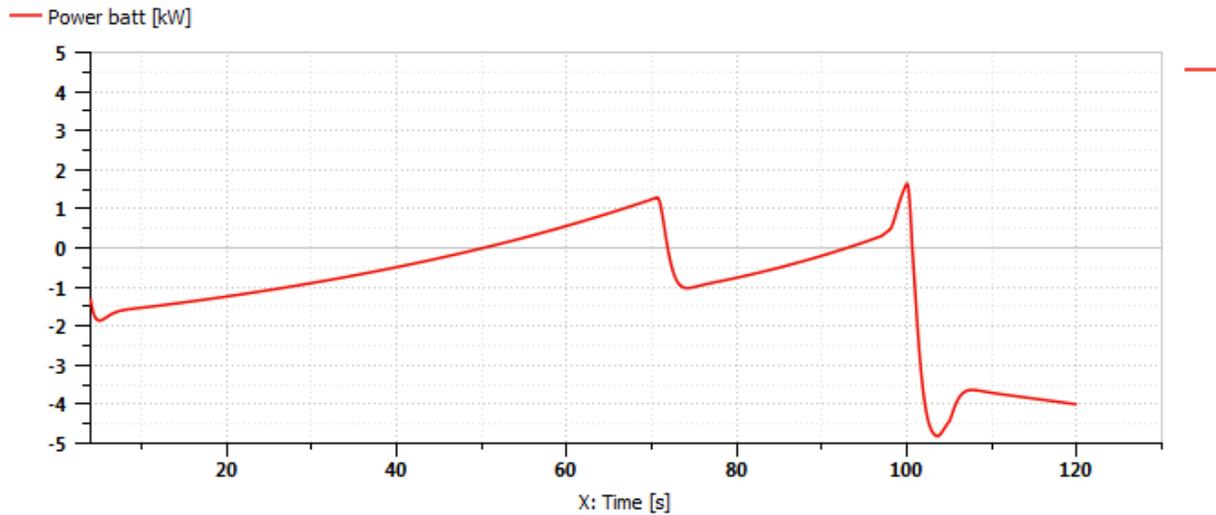


Fig. 6.33: Andamento della potenza della batteria.

Riportiamo ora i valori di PR ed efficienza EVT in funzione di SR. In questo caso il valore di PR è stato calcolato tenendo in considerazione la potenza del motore EM 1 a livello del motore ICE. Il suo andamento mostra che quando $PR = 0$ si ottiene un valore di SR corrispondente al secondo punto meccanico, rappresentato in Fig. 6.34.

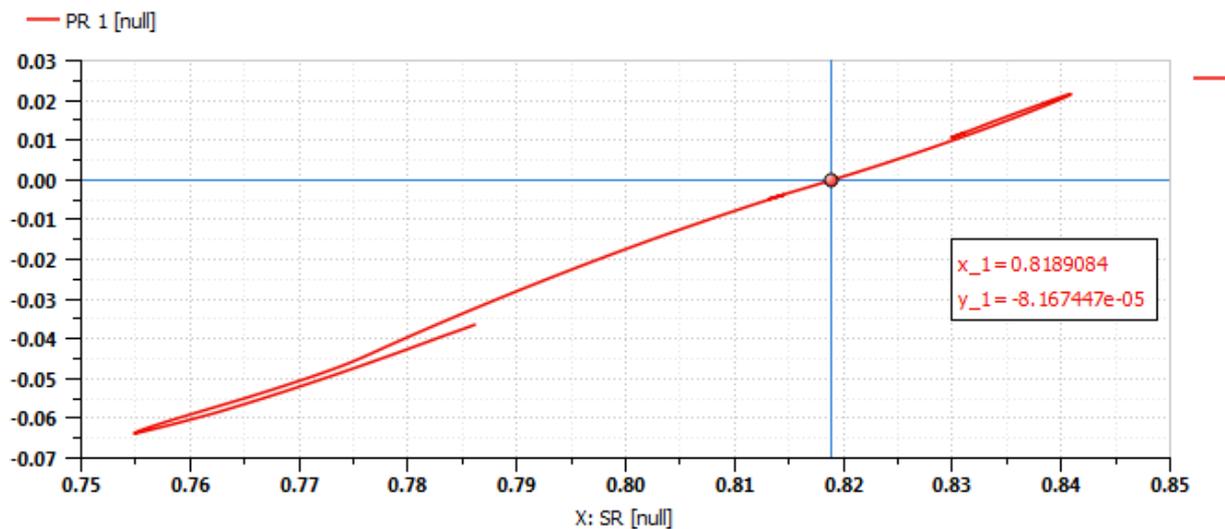


Fig. 6.34: Andamento PR in funzione di SR.

In questo caso per PR positivo si intende la parte ricircolata attraverso il motore EM 1, molto bassa perché tale ruolo è riservato al motore EM 2, e la parte negativa è data dalla potenza che circola lungo il percorso chiuso.

L'efficienza EVT in prossimità del punto meccanico 2 è riportata in Fig. 6.35. Si evince che il massimo della efficienza è in prossimità del punto meccanico e andando a destra e sinistra

di questo essa si riduce per cui sarebbe opportuno lavorare anche in questo caso vicino il punto meccanico.

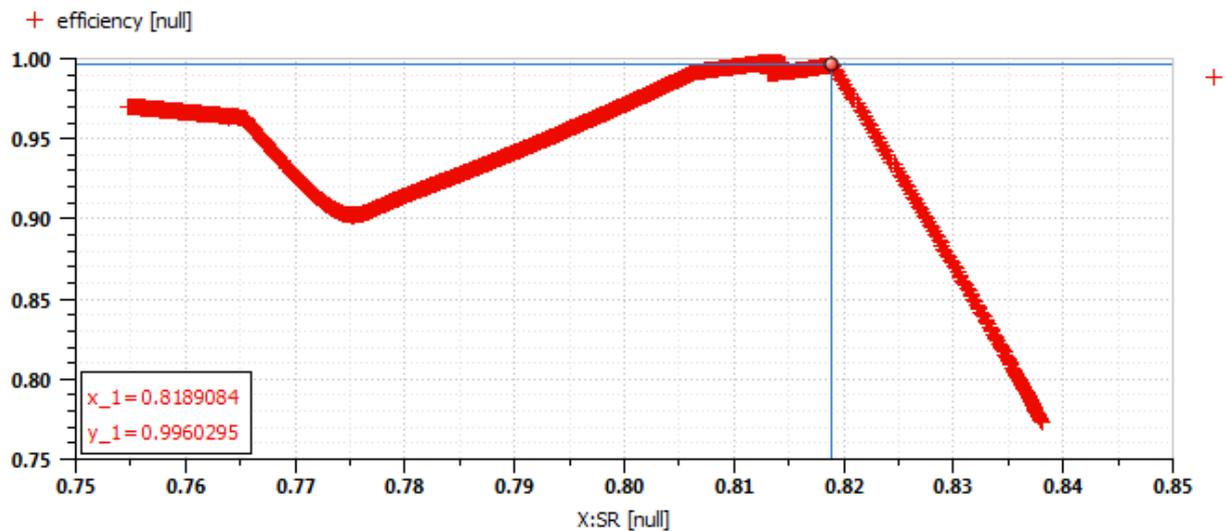


Fig. 6.35: Andamento efficienza EVT in funzione di SR.

Per poter fare in modo di avere una efficienza più alta possibile in un range di SR esteso, tale architettura di veicolo ibrido con sistema EVT 2 mode permette, di effettuare una doppia modalità di funzionamento EVT in modo da lavorare sulla curva di efficienza ottenuta mediante l'involuppo delle due efficienze, come riportato in Fig. 6.36 . Tale andamento evidenzia che la modalità input split in rosso, conviene utilizzarla per valori di SR alti, in corrispondenza di velocità di veicolo più basse, mentre la modalità compound split potrà essere selezionata in seguito per cercare di migliorare l'efficienza verso valori di SR bassi, in corrispondenza di velocità veicolo maggiore.

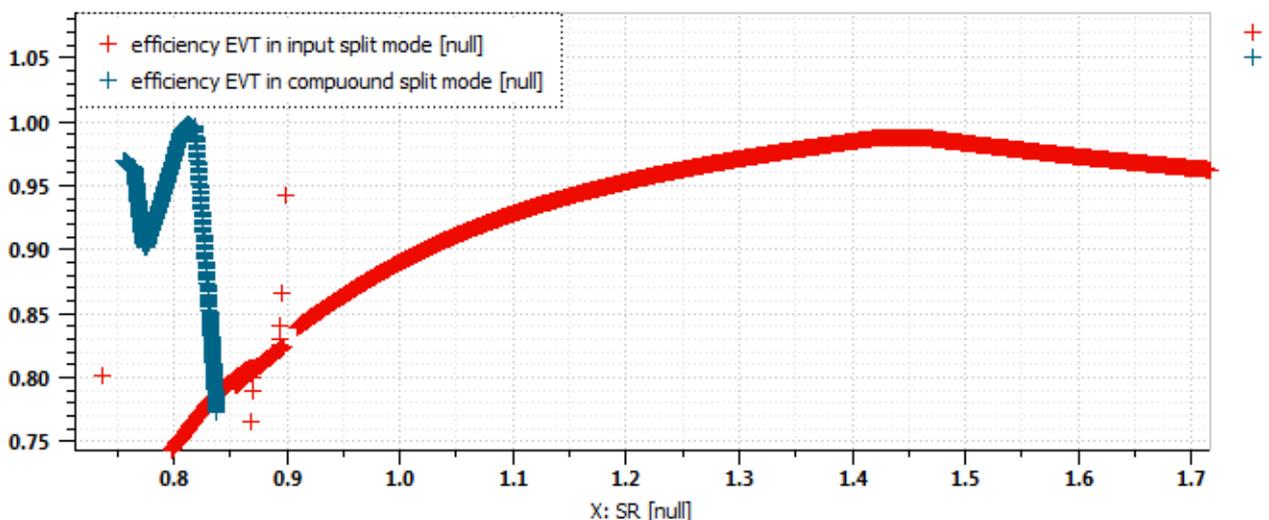


Fig. 6.36: Andamento efficienze nelle diverse modalità di funzionamento.

Riportiamo i punti di funzionamento del motore ICE in Fig. 6.37, essi si trovano in prossimità della E line per cui il motore termico lavora in condizioni di basso consumo e alta efficienza.

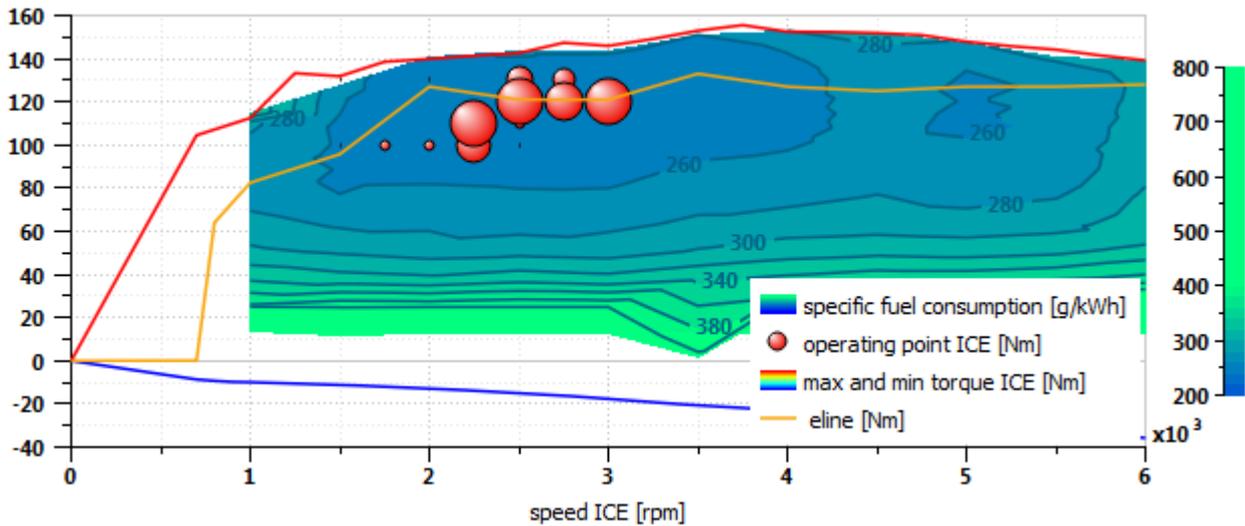


Fig. 6.37: Punti di funzionamento ICE.

Per quanto riguarda i punti di funzionamento delle macchine elettriche si è omesso di riportarli in quanto la coppia che eroga il motore EM 1 è circa costante pari a -25 [Nm], mentre la coppia che eroga EM 2 è circa costante a -10 [Nm]. La macchina EM 1 lavora prevalentemente nel 3° quadrante, quindi da motore elettrico, la macchina EM 2 lavora nel secondo quadrante quindi da generatore. Quindi anche in questo caso le due macchine utilizzate sono sovradimensionate e si potrebbe pensare di utilizzare macchine elettriche di taglia più piccola limitando dunque i costi totali e il peso della vettura.

CONCLUSIONI

In conclusione, visto i risultati rilevati e riportati sul consumo di combustibile, si può affermare che il veicolo ibrido serie è adatto a percorsi su strada urbana, mentre in strada extraurbana i consumi aumentano del 58 [%]. Per quanto riguarda il veicolo ibrido parallelo analizzato, ha minori consumi su strada extraurbana meno del 5 [%] rispetto al serie, essendo adatto a missioni diversificate, ma riporta degli incrementi di consumo su strada urbana rispetto al veicolo ibrido serie del 23 [%].

Il veicolo ibrido serie parallelo con EVT 1 mode permette di avere un miglioramento dei consumi in strada extraurbana rispetto sia al veicolo ibrido serie del 13 [%] che parallelo del 9[%], invece i consumi su strada urbana risultano avere una soluzione intermedia tra le due architetture.

Per quanto riguarda l'evoluzione EVT 2 mode, non sono state eseguite analisi di consumo, ma data la migliore efficienza su un range abbastanza ampio di SR, ci si aspetta un abbattimento dei consumi rispetto alla modalità EVT 1 mode.

Inoltre se si considera l'opzione di adottare un ibrido serie plug-in, si ottiene una netta diminuzione dei consumi pari al 48 [%] rispetto alla corrispettiva soluzione serie priva del plug-in e downsizing, rilevati sull'intero ciclo guida WLTC, ma questo comporta delle difficoltà di gestione del veicolo, il cui funzionamento è vincolato dalla ricarica frequente della batteria e quindi dipendenza dall'infrastruttura di ricarica.

L'utilizzo di strategie di controllo, talune differenti per ogni architettura, ha permesso di fare considerazioni riguardanti la gestione della potenza a bordo veicolo per i diversi motori e batteria. Passando da architetture più semplici fino ad arrivare ad architetture più articolate si è potuto riscontrare un diverso ruolo delle macchine elettriche, evidenziando che il generatore vero e proprio esiste solo nell'architettura veicolo serie, in un serie parallelo esso lavora come motore elettrico alternandosi con la macchina elettrica principale nelle diverse missioni di veicolo. Nel veicolo ibrido parallelo invece il motore elettrico è un motore di supporto che serve sia per ridurre l'utilizzo del motore ICE specie nei transitori di accelerazione e ridurre i consumi, ma da un altro aspetto anche per incrementare le prestazioni stesse del veicolo. Per quanto riguarda le trasmissioni, si è passato da architettura serie con trasmissione semplice, cambio di velocità assente, perché non strettamente necessaria se non per incrementare lì dove è possibile la frenata rigenerativa anche ad alti giri del motore elettrico dando la possibilità di avere ancora a disposizione coppia negativa, a un ibrido parallelo con un cambio di velocità a ridosso del differenziale creando un architettura P2.

In questo caso si sono eseguite analisi con differenti penalità di driveability ed esaminare come queste influenzano lo stato di carica e consumi. Altre analisi sono state eseguite per migliorare comfort e guidabilità veicolo nei cambi di marcia evidenziando una possibile modifica del segnale di apertura della frizione.

In seguito si è analizzato in dettaglio il sistema EVT, che permette di eliminare frizioni e cambio, effettuando la regolazione della velocità ICE mediante utilizzo del macchina elettrica. Una evoluzione analizzata è il sistema EVT 2 mode che con l'utilizzo di due PSD articola ancor più la connessione dei motori, ma ottiene una maggiore flessibilità e capacità di gestire in modo opportuno i flussi di potenza mediante la logica di controllo.

Infatti un seguito del lavoro di tesi è quello di studiare e implementare modelli costituiti da sistemi EVT multimodali con il fine incrementare l'efficienza.

Infine, si conclude dicendo che l'intero elaborato mira alla conoscenza dettagliata del comportamento e del funzionamento degli organi essenziali e delle strategie di controllo integrate nelle principali architetture di veicolo ibrido elettrico, sia quelle già note e ampiamente disponibili nel mercato e sia di alcune sperimentali e in via di sviluppo. Mediante analisi di simulazione, si evidenzia la loro diversa peculiarità nella gestione dei motori e della relativa trasmissione, con il fine di valutare aspetti sia in termini di consumo e risparmio di combustibile da parte del motore termico per diverse funzionalità e penalità di driveability, ma soprattutto sulla gestione intelligente dei flussi di potenza, sul ruolo dei motori, la loro connessione e la dinamica del veicolo, cogliendo aspetti che possono essere utili per lo sviluppo del *veicolo del futuro* che vede come uno dei tanti step l'ibridizzazione.

BIBLIOGRAFIA

- Simona Onori, Lorenzo Serrao ,Giorgio Rizzoni, “*HYBRID ELECTRIC VEHICLES ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES*”, Springer London Heidelberg New York Dordrecht, Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering Control, Automation and Robotics , 2016;
- Guido R. Guercioni, “*INTEGRATION OF DUAL-CLUTCH TRANSMISSIONS IN HYBRID ELECTRIC VEHICLE POWERTRAINS*”, Integration of Dual-Clutch Transmissions in Hybrid Electric Vehicle Powertrains, 2018;
- Daniel F. Opila, *Member, IEEE*, Xiaoyong Wang, Ryan McGee, *Member, IEEE*, R. Brent Gillespie, Jeffrey A. Cook, *Fellow, IEEE*, and Jessy W. Grizzle, *Fellow, IEEE* , “*AN ENERGY MANAGEMENT CONTROLLER TO OPTIMALLY TRADE OFF FUEL ECONOMY AND DRIVABILITY FOR HYBRID VEHICLES*”, IEEE transactions on control systems technology, vol. 20, no. 6, November 2012;
- Caihao Weng, Yigang Wang, Vasilis Tsourapas, Chinmaya Patil and Jing Sun, “*OPTIMAL CONTROL OF HYBRID ELECTRIC VEHICLES WITH POWER SPLIT AND TORQUE SPLIT STRATEGIES: A COMPARATIVE CASE STUDY*”, 2011 American Control Conference on O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA, June 29 - July 01, 2011;
- Chang Woo Shin, Jongdae Choi, Suk Won Cha and Wonsik Lim, “*AN OBJECTIVE METHOD OF DRIVEABILITY EVALUATION USING A SIMULATION MODEL FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLES*”, International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing Vol. 15, no. 2, pp. 219-226 February 2014;
- Brian Bole, Samuel Coogan, Carlos Cubero-Ponce, Derek Edwards, Ryan Melsert, David Taylor, “*ENERGY MANAGEMENT CONTROL OF A HYBRID ELECTRIC VEHICLE WITH TWO-MODE ELECTRICALLY VARIABLE TRANSMISSION*”, Los Angeles, California, May 6 - 9, 2012;
- Yalian Yang, Xiaosong Hu, Pei Huanxin, Zhiyuan Peng, “*COMPARISON OF POWER-SPLIT AND PARALLEL HYBRID POWERTRAIN ARCHITECTURES WITH A SINGLE ELECTRIC MACHINE: DYNAMIC PROGRAMMING APPROACH*”, 3 February 2016;
- Namdoo Kim, Jason Kwon and Aymeric Rousseau, “*TRADE-OFF BETWEEN MULTI-MODE POWERTRAIN COMPLEXITY AND FUEL CONSUMPTION*”, The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, EVS-25 Shenzhen, China, Nov. 5-9, 2010;
- D. F. Opila, Xiaoyong Wang, R. McGee, J. A. Cook, and J. W. Grizzle, “*PERFORMANCE COMPARISON OF HYBRID VEHICLE ENERGY MANAGEMENT CONTROLLERS ON REAL-WORLD DRIVE CYCLE DATA*” in 2009 American Control Conference, 2009, pp. 4618–4625;

- G. Paganelli, “CONCEPTION ET COMMANDE D’UNE CHAÎNE DE TRACTION POUR VÉHICULE HYBRIDE PARALLÈLE THERMIQUE ET ÉLECTRIQUE” Université de Valenciennes, 1999.
- G. Paganelli, G. Ercole, A. Brahma, Y. Guezennec, and G. Rizzoni, “A GENERAL FORMULATION FOR THE INSTANTANEOUS CONTROL OF THE POWER SPLIT IN CHARGE-SUSTAINING HYBRID ELECTRIC VEHICLES”, in Proceedings of 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2000;
- N. Kim, S. Cha, and H. Peng, “OPTIMAL EQUIVALENT FUEL CONSUMPTION FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLES” IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 20, no. 3, pp. 817–825, 2012;
- L. Serrao, “A COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLES” Ohio State University, 2009;
- C. Musardo, G. Rizzoni, Y. Guezennec, and B. Staccia, “A-ECMS : AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLE ENERGY MANAGEMENT” Eur. J. Control, vol. 11, no. 4–5, pp. 509–524, 2005;
- O. P. Sharma, S. Onori, and Y. Guezennec, “ANALYSIS OF PONTRYAGIN’S MINIMUM PRINCIPLE-BASED ENERGY MANAGEMENT STRATEGY FOR PHEV APPLICATIONS” in Volume 1: Adaptive Control; Advanced Vehicle Propulsion Systems; Aerospace Systems; Autonomous Systems; Battery Modeling; Biochemical Systems; Control Over Networks; Control Systems Design; Cooperativ, 2012, pp. 145–150;
- L. Guzzella and A. Sciarretta, “VEHICLE PROPULSION SYSTEMS: INTRODUCTION TO MODELING AND OPTIMIZATION”, 3rd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013;
- E. Ostertag, “MONO- AND MULTIVARIABLE CONTROL AND ESTIMATION: LINEAR, QUADRATIC AND LMI METHODS”, 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011;
- H. P. Geering, “OPTIMAL CONTROL WITH ENGINEERING APPLICATIONS”, 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007;
- L. S. Pontryagin, V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze, and E. F. Mishchenko, “THE MATHEMATICAL THEORY OF OPTIMAL PROCESSES” New York, NY: Interscience Publishers, 1962;
- A. Bryson and Y. Ho, “APPLIED OPTIMAL CONTROL: OPTIMIZATION, ESTIMATION, AND CONTROL (REVISED PRINTING)”. New York, NY: Taylor & Francis Group, 1975.

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento speciale va a tutte quelle persone che in modo diretto e indiretto hanno contribuito alla stesura e alla realizzazione dell'intero lavoro di Tesi.

Innanzitutto vorrei ringraziare chi ha reso possibile la realizzazione dell'elaborato mediante loro guida sapiente: il Prof. Alessandro Vigliani, Relatore, il Prof. Mauro Velardocchia, Correlatore, e in modo particolare il Correlatore Prof. Enrico Galvagno per la sua pazienza, grande disponibilità e supporto.

Ringrazio Ing. Antonio Tota e Ing. Guido Guercioni per gli aiuti e i consigli in tutto il percorso di tesi e Ing. Ilaria Garofalo per la sua gentilezza e supporto tecnico ricevuto per il software LMS AMESIM.

I ringraziamenti più grandi vanno a mia mamma e papà per i tanti sacrifici fatti, per il sostegno morale, per quella energia, forza d'animo e coraggio trasmessa che mi ha permesso di completare il mio percorso di studio. A mia sorella Veronica, mia nonna e i miei zii che mi sono stati vicini nonostante i diversi chilometri di distanza. A mio zio Antonio che con le sue parole mi ha sempre spronato a migliorare. Un pensiero a te nonno, che da lassù continui a sussurrarmi "forza e coraggio" e a non distogliermi dall'obiettivo.

Vorrei ringraziare gli amici di sempre e di mille avventure, quelli che non hai bisogno di elencare perché ci sono da una vita e continuano a darmi sostegno, calore e fiducia.

Un grazie infine ai colleghi con cui ho condiviso il "pacchetto completo d'emozioni" che solo il Politecnico può dare. Ai miei amici Giuseppe, Gerlando, Luca, a Giulia e i coinquilini Vito e Francesco che mi supportano e sopportano tutti i giorni, a loro devo gli ottimi consigli di vita e la voglia trasmessa di non mollare.

Grazie per l'attenzione.