

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA
TESI DI LAUREA MAGISTRALE

In

PROPULSORI TERMICI E IBRIDI PER AUTOVEICOLI M C.I.

**SVILUPPO DI UN AMBIENTE DI SIMULAZIONE
PER L'ANALISI ENERGETICA
DI UNA SUPERCAR A TRAZIONE ELETTRICA**

RELATORE

Prof. Ing. Nicolò Cavina

CANDIDATO

Antonio Bianco

CORRELATORI

Ing. Matteo Tassinari

Ing. Elena Ligabue

Anno Accademico 2019/2020

Sessione III

Indice

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1: AZIENDA	3
1.1 LA STORIA	3
1.2 LE COMPETIZIONI	6
1.3 LA CONTINUA INNOVAZIONE	7
CAPITOLO 2: VETTURE A TRAZIONE ELETTRICA	9
2.1 INTRODUZIONE AI VEICOLI ELETTRICI	9
2.2 COMPONENTI DI UN VEICOLO ELETTRICO.....	10
2.2.1 Batterie	10
2.2.2 Motori elettrici.....	11
2.2.3 Energy Management System	13
CAPITOLO 3: SOFTWARE UTILIZZATI	15
3.1 MATLAB	15
3.2 SIMULINK.....	16
CAPITOLO 4: AMBIENTE DI SIMULAZIONE.....	17
4.1 INTERFACCIA PRINCIPALE	17
4.1.1 Input necessari per la simulazione	19
4.2 DRIVER	20
4.3 CENTRALINA	23
4.4 SPLIT COPPIA	36
4.5 MOTORI	47
4.6 BATTERIA.....	48
4.7 VEICOLO	49
4.8 SCOPE	55
CAPITOLO 5: SIMULAZIONE E ANALISI DATI	58
5.1 SIMULAZIONE E ANALISI DATI - WLTC.....	60
5.2 SIMULAZIONE E ANALISI DATI - UDDS.....	68
5.3 SIMULAZIONE E ANALISI DATI - AUTOSTRADALE	77
CONCLUSIONI	87
BIBLIOGRAFIA & SITOGRAFIA	89
RINGRAZIAMENTI.....	90

Indice Figure

Figura 1 Enzo Ferrari	3
Figura 2 La prima Ferrari: la 125s	4
Figura 3 Ferrari F2004	6
Figura 4 Ferrari SF90 Stradale	8
Figura 5 Illustrazione veicolo BEV	9
Figura 6 Motore a induzione trifase	11
Figura 7 Motore brushless trifase	12
Figura 8 Interfaccia principale MATLAB	15
Figura 9 Interfaccia principale Simulink	16
Figura 10 Interfaccia principale ambiente di simulazione	18
Figura 11 Ciclo di guida WLTC	19
Figura 12 Ciclo di guida UDDS	19
Figura 13 Ciclo di guida Autostradale	20
Figura 14 Esterno blocco Driver	20
Figura 15 Interno blocco Driver	21
Figura 16 MATLAB function - Richiesta forza-freno	22
Figura 17 Esterno blocco Centralina	23
Figura 18 Interno blocco Centralina	24
Figura 19 Calcolo coppia richiesta in centralina	24
Figura 20 Selettore RPM in funzione della configurazione	26
Figura 21 Ricerca delle correnti	27
Figura 22 Esterno blocco Calcolo configurazione ottima	28
Figura 23 Interno blocco Calcolo configurazione ottima	28
Figura 24 MATLAB function - Ricerca corrente minima	29
Figura 25 Interno blocco Cambio Configurazione	30
Figura 26 Interno blocco Calcolo Energia	30
Figura 27 Potenze e Configurazioni Centralina - WLTC	32
Figura 28 Dettaglio Andamento Potenze e Configurazioni Centralina – WLTC	33
Figura 29 Esterno blocco Timer Cambio Configurazione	33
Figura 30 Interno blocco Timer Cambio Configurazione	34
Figura 31 MATLAB function - Scenario	34
Figura 32 MATLAB function - Scelta Scenario	34

Figura 33 Interno blocco Timer ed interno contatore	35
Figura 34 MATLAB function - Conf_all.....	35
Figura 35 Esterno blocco Split Coppia	36
Figura 36 Interno blocco Split Coppia	37
Figura 37 Logica selettore.....	37
Figura 38 Segnale Asse Selettore – Agganciato – Sincronizzatore	39
Figura 39 Confronto tra assi per il cambio configurazione.....	40
Figura 40 Calcolo coppia Driver	40
Figura 41 Esterno blocco connessione/disconnessione motori	41
Figura 42 Interno blocco connessione/disconnessione motori.....	42
Figura 43 Logica sincronizzatore	43
Figura 44 Logica gestione motori quando sganciati	43
Figura 45 Interno controllore PI Rear	45
Figura 46 Interno blocco Saturatori Dinamici.....	45
Figura 47 Logica coppia richiesta ai motori.....	46
Figura 48 Esterno blocco Motori	47
Figura 49 Interno blocco Motori	48
Figura 50 Esterno blocco Batteria	48
Figura 51 Esterno blocco Veicolo	49
Figura 52 Interno blocco Veicolo.....	50
Figura 53 Logica inversione modello - Calcolo Forza.....	51
Figura 54 Interno blocco Trasmissione Rear Left.....	51
Figura 55 Logica inversione modello - Calcolo Velocità Vettura	52
Figura 56 Calcolo RPM motori quando sganciati.....	53
Figura 57 Esterno blocco Scope.....	55
Figura 58 Interno blocco Scope	56
Figura 59 Interno blocco Calcolo Errore.....	57
Figura 60 Interno blocco Cicli Effettuati	57
Figura 61 Trigger Cicli Effettuati.....	57
Figura 62 Guadagno Optimal – WLTC.....	60
Figura 63 Configurazione Ottima – WLTC	61
Figura 64 Segnale Frizioni Asse Anteriore – WLTC.....	61
Figura 65 Segnale Frizioni Asse Posteriore - WLTC	61

Figura 66 Coppia Asse Anteriore - WLTC	62
Figura 67 Coppia Asse Posteriore – WLTC.....	62
Figura 68 RPM Asse Anteriore - WLTC	63
Figura 69 RPM Asse Posteriore - WLTC	63
Figura 70 Mappa Posteriore Optimal – WLTC.....	64
Figura 71 Mappa Posteriore Trazione Posteriore – WLTC	65
Figura 72 SOC – WLTC	66
Figura 73 Corrente – WLTC	66
Figura 74 Tensione - WLTC	66
Figura 75 Guadagno Cambio Timer – WLTC	67
Figura 76 Guadagno Optimal – UDDS	68
Figura 77 Configurazione Ottima – UDDS.....	69
Figura 78 Segnale Frizioni Asse Anteriore – UDDS	69
Figura 79 Segnale Frizioni Asse Posteriore - UDDS.....	69
Figura 80 Coppia Asse Anteriore – UDDS.....	70
Figura 81 Coppia Asse Posteriore – UDDS	70
Figura 82 RPM Asse Anteriore – UDDS	71
Figura 83 RPM Asse Posteriore – UDDS	71
Figura 84 Dettaglio Andamento Potenze e Configurazioni tratto iniziale - UDDS.....	72
Figura 85 Mappa Anteriore Optimal - UDDS.....	73
Figura 86 Mappa Anteriore Trazione Anteriore – UDDS.....	74
Figura 87 SOC – UDDS.....	75
Figura 88 Corrente – UDDS.....	75
Figura 89 Tensione – UDDS	75
Figura 90 Guadagno Cambio Timer – UDDS.....	76
Figura 91 Guadagno Optimal – Autostradale	77
Figura 92 Configurazione Ottima – Autostradale	78
Figura 93 Segnale Frizioni Asse Anteriore – Autostradale.....	78
Figura 94 Segnale Frizioni Asse Posteriore - Autostradale	78
Figura 95 Coppia Asse Anteriore – Autostradale	79
Figura 96 Coppia Asse Posteriore – Autostradale	79
Figura 97 RPM Asse Anteriore – Autostradale	80
Figura 98 RPM Asse Posteriore – Autostradale.....	80

Figura 99 Mappa Posteriore Optimal - Autostradale	81
Figura 100 Mappa Posteriore Trazione Posteriore – Autostradale	82
Figura 101 Potenze Configurazioni – Autostradale	83
Figura 102 Dettaglio Potenze – Autostradale	83
Figura 103 Dettaglio Andamento Potenze e Configurazioni tratto iniziale - Autostradale	84
Figura 104 SOC – Autostradale	85
Figura 105 Corrente – Autostradale	85
Figura 106 Tensione – Autostradale	85
Figura 107 Guadagno Cambio Timer - Autostradale.....	86

INTRODUZIONE

Lo scopo di questa Tesi di Laurea è quello di sviluppare un ambiente di simulazione (modello) per l'analisi energetica di una Supercar a trazione elettrica (BEV Battery Electric Vehicle), dove al suo interno viene implementato un algoritmo di gestione delle macchine elettriche, nell'ottica di ottimizzare il range di chilometri percorsi con un ciclo di scarica della batteria.

Tale progetto di tesi è stato svolto con il Prof. Ing. Nicolò Cavina, docente del corso Propulsori Termici e Ibridi per Autoveicoli M C.I., e con Ferrari S.p.A., in particolare con il reparto Direzione Tecnica - Ente Ibrido, con la supervisione dell'Ing. Matteo Tassinari e l'Ing. Elena Ligabue.

Il seguente elaborato si sviluppa in tre parti:

Una prima parte introduttiva, dove viene illustrato il lavoro svolto e lo scenario attuale e futuro del mondo dell'automotive.

Una parte centrale, il corpo della tesi, dove viene descritto nel dettaglio l'ambiente di simulazione.

Una parte conclusiva, dove si analizzano i risultati ottenuti e si cercano eventuali migliorie del sistema descritto.

L'ambiente di lavoro utilizzato per la costruzione del modello è MATLAB & Simulink.

Partendo dai modelli forniti di motori e batteria, è stata creata la restante parte.

Nello specifico i modelli creati sono:

Driver

Il suo compito è quello di simulare le richieste che farebbe un utente durante l'utilizzo della vettura.

Centralina

E' il cuore del lavoro svolto, al suo interno viene sviluppato l'algoritmo per la gestione dei motori.

Split Coppia

All'interno del quale viene elaborata la richiesta di coppia ai motori, in funzione della configurazione. Il modello dei motori, insieme a quello della batteria, provvederà poi a trasformare la richiesta di coppia in una coppia "attuata", considerando i vincoli legati alle prestazioni presenti in un motore elettrico ed in una batteria.

Veicolo

Ha il compito di simulare il comportamento della vettura, cioè viene rappresentata la risposta dell'automobile sulla base delle richieste dell'utente.

Scope

E' un subsystem dove vengono raccolti i dati rilevanti della simulazione, in modo tale da poterli visionare in modo semplice e intuitivo.

Una volta costruito il modello completo, sono state effettuate le simulazioni con successiva raccolta e analisi dei dati.

E' stata studiata la bontà dell'algoritmo creato, in termini di benefici dal punto di vista dei chilometri percorsi e di risposta del sistema in termini di guidabilità.

Grazie a questo lavoro è stata costruita una solida base sulla quale evolvere l'algoritmo di gestione dei motori trovato, al fine di analizzare anche altri possibili scenari, oltre a poter effettuare ulteriori test in fase di simulazione, importanti per poter stimare con accuratezza il comportamento del sistema reale.

Il motivo principale che mi ha spinto ad approfondire tale tematica, è la passione per il mondo dei motori e tutto ciò che lo circonda, l'affascinante livello di tecnologia che si cela all'interno delle moderne autovetture, oltre al non trascurabile aspetto ambientale da considerare nei possibili scenari futuri.

CAPITOLO 1: AZIENDA

Ferrari S.p.A. è un'azienda automobilistica italiana simbolo di eccellenza ed esclusività.

Produce vetture uniche nel suo genere, rappresentando il “Made in Italy” in tutto il mondo.

Ogni singola vettura viene ideata e prodotta a Maranello, in Italia.

Oltre alla produzione di vetture stradali, Ferrari è impegnata attivamente anche in numerose competizioni nel mondo delle corse.

1.1 La Storia

Tutto ciò che è, e rappresenta Ferrari oggi, lo deve al suo fondatore Enzo Ferrari, alla sua passione e alla sua determinazione.



Figura 1 Enzo Ferrari

Nato il 18 Febbraio 1898 a Modena, Ferrari mostrò sin da ragazzo la sua passione per le automobili.

Superati i duri anni della Grande Guerra, si trasferì a Torino, dove trovò occupazione nella Carrozzeria Giovannoni, specializzata nel recupero di autocarri leggeri, dismessi dall'uso bellico.

Oltre al lavoro d'officina, il compito dell'allora giovane Ferrari, era quello di collaudare gli autotelai ricondizionati e consegnarli all'azienda committente a Milano. Sviluppò così un'ottima abilità di guida, che gli permise di essere assunto come assistente al collaudo in una piccola impresa milanese, la CMN (Costruzioni Meccaniche Nazionali).

Iniziò così la carriera da pilota nel mondo delle corse di Enzo Ferrari.

Dopo alcune gare, divenne pilota ufficiale dell'Alfa Romeo e dopo il Gran premio del Circuito del Savio, conobbe la Contessa Paolina Biancoli, madre di Francesco Baracca, eroico pilota dell'aviazione italiana durante la Prima Guerra Mondiale.

Fu la Contessa a suggerirgli di utilizzare come portafortuna, l'emblema personale del figlio, un cavallino rampante.

All'età di 31 anni, nel 1929, fonda a Modena in Viale Trento e Trieste, la Scuderia Ferrari, con lo scopo di far partecipare alle competizioni automobilistiche i propri soci.

Nel 1938 diviene direttore di Alfa Corse, incarico che nel 1939 lasciò per dar vita ad un nuovo progetto presso la vecchia sede della Scuderia, l'Auto Avio Costruzioni.

Il "Drake", soprannome attribuitogli per via della sua forte determinazione, come il famoso corsaro inglese, realizzò nella nuova azienda una vettura sportiva denominata 815, una spider 8 cilindri 1500 cm³, costruita in due esemplari che partecipò alla Mille Miglia del 1940.

Alla fine del 1943 l'Auto Avio Costruzioni fu trasferita da Modena a Maranello, dove venne progettata la prima Ferrari, la 125s, con un motore 12 cilindri 1500 cm³.



Figura 2 La prima Ferrari: la 125s

L'11 Maggio 1947 debutta sul Circuito di Piacenza, per poi vincere la sua prima gara al Gran Premio di Roma il 25 Maggio 1947, dando vita al mito Ferrari.

A fine anni '50, tutto il mondo conoscerà il nome Ferrari, per i sorprendenti risultati sportivi e industriali ottenuti.

Con il passare degli anni, Ferrari diventa sempre più una realtà consolidata, che gode di un know-how tecnologico rilevante e di ingenti capitali derivanti anche da importanti sponsorizzazioni.

A fine anni '80, Ferrari attraversa forse il momento più delicato della sua storia, quando nel 1988 si ha la triste scomparsa del suo fondatore, Enzo Ferrari.

Nonostante ciò, il successo dell'azienda continua a crescere fino ai giorni nostri, spinto da risultati nel mondo delle corse e traguardi industriali sempre più importanti.

Ferrari diventa uno dei Brand più influenti al mondo, icona di stile, lusso e velocità.

Il 4 Gennaio 2016, Ferrari viene quotata anche su Borsa Italiana, divenendo una Società indipendente, dopo che nell'Ottobre del 2015 era stata ammessa alla quotazione sul New York Stock Exchange.

1.2 Le Competizioni

Da sempre, il nome Ferrari è accostato al mondo delle corse.

Nel corso degli anni ha ottenuto svariati successi in diverse categorie, ma i brillanti risultati ottenuti in Formula 1 hanno contribuito a rendere celebre Ferrari in tutto il mondo.



Figura 3 Ferrari F2004

Al giorno d'oggi può vantare 15 Titoli mondiali Piloti e 16 Titoli mondiali Costruttori, oltre ad essere l'unico team ad aver preso parte a tutte le edizioni del Campionato del Mondo di Formula1, sin dalla sua prima edizione nel lontano 1950.

Ferrari ha ottenuto altrettanti risultati eccellenti anche nelle competizioni GT.

Attualmente sono 26 i Titoli Costruttori vinti in campionati FIA e 5 le Coppe del Mondo Costruttori vinte nel World Endurance Championship.

La Casa di Maranello vinse la sua prima 24 Ore di Le Mans nel 1949 e si aggiudicò il primo Mondiale Marche della storia nel 1953.

Come prova del forte interesse che Ferrari ha nei confronti delle persone, tra cui i suoi clienti, negli anni sono state ideate una serie di attività loro dedicate, ed è stato realizzato il Dipartimento Ferrari Corse Clienti, con sede sulla Pista di Fiorano.

Dipartimento che si occupa tuttora: dell'organizzazione a livello internazionale delle tre serie continentali del Ferrari Challenge Trofeo Pirelli, campionato monomarca Ferrari; del coinvolgimento delle vetture d'epoca in manifestazioni di prestigio; del supporto alla clientela nei Campionati GT internazionali oltre a gestire attività non competitive come F1 clienti e i Programmi XX, che coinvolgono auto come la FXX K, vettura ibrida, con 1050 CV.

1.3 La continua innovazione

Un' aspetto fondamentale per la costruzione del mondo Ferrari, è l'importanza che viene riservata alle Persone, patrimonio più importante.

Il programma "Formula Uomo", nato negli anni '90 e sviluppato fino ad oggi, è motivo dei continui cambiamenti negli stabilimenti, sfruttando le migliori tecnologie nel segno della sicurezza e della qualità della vita.

Sulla scia di questo pensiero, la sede di Maranello è in continuo sviluppo, cercando costantemente di migliorare l'interazione azienda-lavoratori in termini di benessere di questi ultimi; come ad esempio: l'arricchimento delle aree verdi al fine di migliorare l'ambiente lavorativo e regolare il microclima.

Ferrari può vantare l'indipendenza energetica, soddisfacendo i suoi fabbisogni con un impianto di trigenerazione (produzione di energia elettrica, termica e frigorifera) e con fonti rinnovabili. Inoltre, la nuova sede della Scuderia Ferrari, sul lato opposto della strada rispetto all'ingresso della storica sede, adotta le specifiche NZEB (Net Zero Emission Building).

Per quanto riguarda le proprie vetture, Ferrari, può vantare un'ampia gamma di "gioielli su quattro ruote", simboli di esclusività, performance, design e qualità tutta italiana.

Rappresenta una realtà dove Tradizione e Innovazione si fondono continuamente, ponendo uno sguardo al futuro, senza dimenticare il passato; con un occhio di riguardo anche all' ambiente.

Ferrari ha dimostrato tutto ciò con la produzione della Ferrari SF90 Stradale, la prima vettura ibrida plug-in della casa, ispirata all'omonima monoposto di Formula1.



Figura 4 Ferrari SF90 Stradale

Essa è l'espressione più avanzata della tecnologia sviluppata a Maranello, dimostrando come le conoscenze acquisite attraverso le competizioni hanno trovato applicazione nelle vetture stradali.

CAPITOLO 2: VETTURE A TRAZIONE ELETTRICA

L'evoluzione tecnologica che da sempre ha contraddistinto la storia dell'uomo, continua a spingere anche il mondo delle automobili verso nuovi scenari.

Le problematiche legate all'ambiente, e la necessità sempre più pressante di uno sviluppo sostenibile, sta spostando l'attenzione delle case automobilistiche verso la produzione di vetture elettriche.

Si sta vivendo in questi anni una fase di transizione, dove da vetture "tradizionali", cioè spinte da motori termici, si è passati attraverso un processo di graduale elettrificazione a delle vetture equipaggiate con powertrain ibridi, fino ad arrivare, in un futuro non molto lontano, ad avere solo delle vetture full-electric in circolazione.

L'impiego dei veicoli elettrici in sostituzione a quelli tradizionali, è tuttora oggetto di molti studi, ma l'obiettivo comune è quello di attuare una vera e propria rivoluzione ambientale e tecnologica.

2.1 Introduzione ai veicoli elettrici

Analizzando il funzionamento di un veicolo elettrico, molto semplicisticamente, possiamo affermare che esso utilizza l'energia elettrica accumulata in delle batterie per movimentare il mezzo.

Il modo in cui esso utilizza questa energia, è dettato dalle logiche che vengono implementate all'interno della centralina, in funzione degli obiettivi che si vogliono raggiungere, come ad esempio ampliare l'autonomia del veicolo.

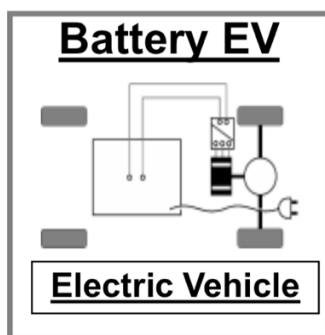


Figura 5 Illustrazione veicolo BEV

I principali vantaggi dell'utilizzo di un veicolo elettrico sono:

- Zero emissioni allo scarico.
- Recupero parziale di energia (modalità generatore).
- Ridotta manutenzione per via della buona affidabilità delle componenti (migliore rispetto ai motori termici).
- Possibilità di ricarica mediante fonti rinnovabili.

L'introduzione delle vetture elettriche nella società odierna è un qualcosa che sta avvenendo in maniera graduale, in quanto oltre alle case automobilistiche, anche le città hanno il bisogno di "adeguarsi" a tutto ciò che l'elettrificazione comporta, come ad esempio le giuste infrastrutture per la ricarica di tali automobili.

2.2 Componenti di un veicolo elettrico

Il costo di una vettura elettrica, nella maggior parte dei casi, è ancora abbastanza elevato, ma a giustificare tale costo di acquisto basti pensare all'avanzata ed innovativa tecnologia che equipaggia tali vetture.

Tra le tante componenti (Hardware e Software), le principali sono: Batterie, Motori e Sistema di controllo dell'energia (Energy Management System).

2.2.1 Batterie

Le batterie sono tutt'oggi oggetto di forte ricerca da parte delle case automobilistiche e non solo, in quanto sono uno dei punti deboli della trazione elettrica, per via del costo, della ridotta autonomia, dell'elevato tempo di ricarica, e della breve vita utile.

Si sta cercando di minimizzare questi problemi tramite lo studio e la ricerca di nuove chimiche e tecnologie che permettano alle celle una migliore durata, affidabilità e sostenibilità, portando lo sviluppo tecnologico delle batterie verso nuove frontiere.

2.2.2 Motori elettrici

Il motore, da sempre, è ciò che caratterizza un'automobile, il cuore della vettura.

I motori elettrici presentano notevoli vantaggi rispetto ai classici motori a combustione, il primo fra tutti è l'elevato rendimento, valori mediamente compresi tra 0.8 e 0.9.

Possono funzionare in modalità generatore, permettendo un parziale recupero dell'energia cinetica della vettura, e necessitando di un minor raffreddamento permettono un'aerodinamica del veicolo più efficiente.

Inoltre, calibrando in modo accurato i sistemi di controllo, si riescono ad ottenere ottime regolazioni di coppia e velocità a seconda delle condizioni operative in cui ci si trova.

Per ciò che riguarda la trazione elettrica, le principali tipologie di motori utilizzati sono due:

- Motori a induzione trifase (corrente alternata)

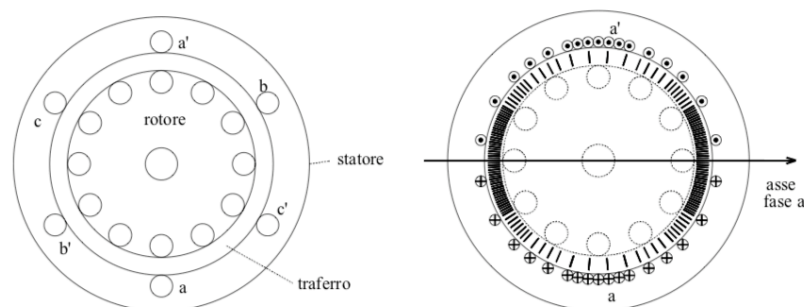


Figura 6 Motore a induzione trifase

Il motore è composto da una parte fissa detta statore e una parte mobile detta rotore.

Lo statore è formato da un pacco di lamierini aventi la forma di corona circolare; le scanalature interne al pacco di lamierini accolgono l'avvolgimento statorico.

Il rotore è situato all'interno dello statore ed è costituito da un pacco di lamierini aventi la forma di corona circolare e delle scanalature esterne per accogliere l'avvolgimento rotorico.

Tra statore e rotore è lasciato un piccolo spazio, per la libera rotazione del rotore, detto traferro, che funge da dielettrico (qualche decimo di millimetro).

Il principio di funzionamento si basa sulla conversione elettromeccanica tipica dei sistemi a induzione, sfruttando la diretta applicazione di un campo magnetico rotante.

L'avvolgimento statorico è alimentato con una corrente alternata, la quale genera un campo magnetico rotante (campo di statore), per via della disposizione delle coppie polari sfasate tra loro.

Si creano quindi, per induzione magnetica, delle correnti sugli avvolgimenti del rotore, che a loro volta generano un campo magnetico rotorico.

L'interazione tra i due campi magnetici (statorico e rotorico), genererà una coppia sull'avvolgimento rotorico, dando vita così alla rotazione del rotore.

- Motori brushless trifase (corrente alternata)

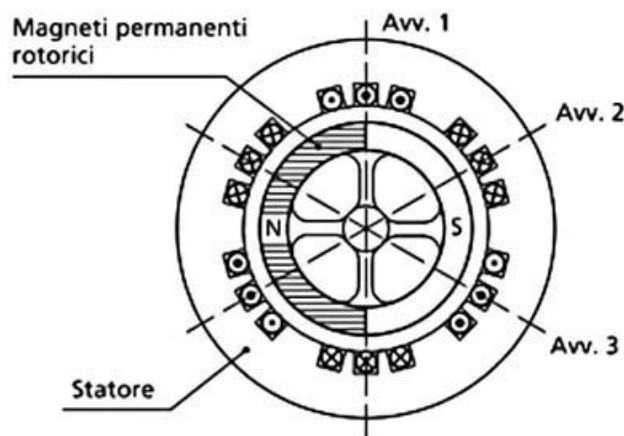


Figura 7 Motore brushless trifase

Rispetto alla classica costruzione di un motore elettrico DC, i motori brushless presentano delle differenze.

La principale, la si può notare nel rotore a magneti permanenti, che non necessita quindi di contatti elettrici striscianti sull'albero, denominati spazzole, per poter funzionare. Ciò comporta notevoli vantaggi sia in termini prestazionali, che di affidabilità.

Il principio di funzionamento si basa sulla variazione dell'orientamento del campo magnetico, generato dalla commutazione della corrente circolante negli avvolgimenti dello statore, che avviene elettronicamente, sulla base di una misura della posizione dell'albero del rotore.

Il principio di attrazione e repulsione magnetica che si sviluppa tra statore e rotore, permette la rotazione di quest'ultimo.

2.2.3 Energy Management System

Il sistema di gestione dell'energia è la parte pensante della vettura, in quanto gestisce le strategie da attuare in funzione di diversi parametri di input, per citarne alcuni: il SOC (State of Charge) della batteria, o le richieste da parte del guidatore.

Esistono diverse strade che possono essere intraprese per l'ottimizzazione dell'energia, ma le possiamo raggruppare fondamentalmente in due grandi categorie:

- Rule Based Optimization Methods
- Model Based Optimization Methods

La principale caratteristica dell'approccio Rule Based è la sua efficacia nell'implementazione Real Time.

Si basa su una serie di regole che vengono applicate in ogni momento, generate su base euristica, intuitiva o partendo dalla conoscenza della soluzione globale ottimale generata tramite degli algoritmi di ottimizzazione.

L'approccio Model Based si basa sulla minimizzazione di una cost function (funzione obiettivo), che permette di identificare la soluzione ottima.

Questa metodologia si può basare o meno sulla conoscenza futura delle informazioni di guida. Nel caso in cui l'ottimizzazione faccia uso della conoscenza del ciclo di guida, e non possa quindi essere implementata direttamente in Real Time, si può ottenere la soluzione ottima globale; ma il suo utilizzo è limitato alla fase di progettazione della logica di controllo dell'energia a bordo del veicolo, per formulare delle regole da implementare online o per fornire spunti e indicazioni per strategie model-based, che si basano solo sulla conoscenza dello stato attuale del sistema e permettono un'ottimizzazione locale; oltre ad essere utilizzata come benchmark o riferimento a cui tendere.

CAPITOLO 3: SOFTWARE UTILIZZATI

I software utilizzati per la creazione dell'ambiente di simulazione e l'analisi dei dati sono MATLAB & Simulink.

3.1 MATLAB

MATLAB, abbreviazione di MATrix LABoratory, è un software creato da MathWorks, per il calcolo numerico e l'analisi dei dati.

Sfrutta un linguaggio di programmazione per manipolare matrici, implementare algoritmi, creare interfacce utente e tanti altri strumenti utili nel mondo dell'Ingegneria e non solo.

L'interfaccia principale è composta da diverse finestre, posizionabili secondo le proprie esigenze, per rendere più comodo e intuitivo l'ambiente di lavoro.

Le finestre fondamentali sono:

- Command window, usato principalmente per visualizzare i risultati ottenuti.
- Workspace, dove sono salvate tutte le variabili utilizzate.
- Current directory, dove si visualizza il percorso che ci riporta alla directory all'interno della quale verrà salvato il lavoro svolto.
- Current folder, dove si trovano tutti i file all'interno della cartella selezionata, solitamente la stessa della directory di lavoro.
- Editor, finestra che si apre non appena si decide di implementare un nuovo script

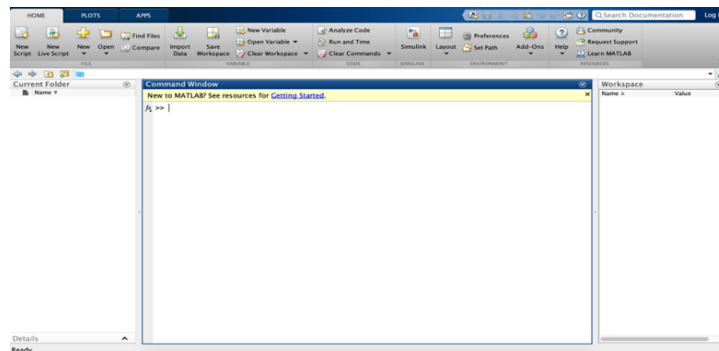


Figura 8 Interfaccia principale MATLAB

Inoltre, MATLAB contiene al suo interno numerosi Toolbox che permettono all'utente di ampliare il range di utilizzo del software.

3.2 Simulink

Uno dei principali software integrati in MATLAB è Simulink.

Esso è un ambiente di simulazione grafico ed è utilizzato per la modellazione, simulazione e analisi di sistemi dinamici; anch'esso è sviluppato dalla compagnia Americana MathWorks.

L'interfaccia principale si presenta come un foglio bianco sul quale poter costruire il proprio modello, secondo le logiche assegnate, rappresentando sotto forma di schemi a blocchi l'insieme di equazioni che regolano il sistema da studiare.

Per la creazione del modello si ha a disposizione una vasta libreria, dove poter attingere per trovare il blocco di interesse.

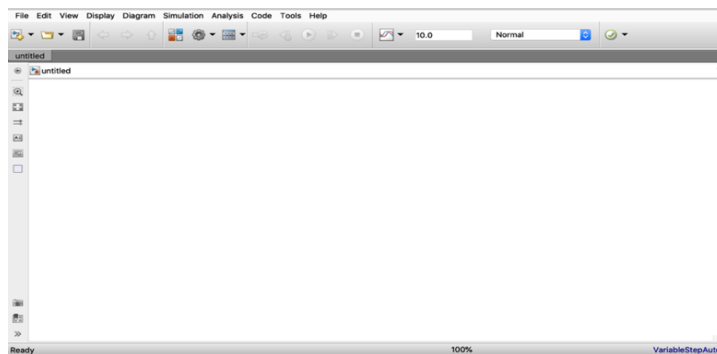


Figura 9 Interfaccia principale Simulink

CAPITOLO 4: AMBIENTE DI SIMULAZIONE

Come illustrato precedentemente, l'ambiente di simulazione sul quale è stata effettuata l'analisi energetica della vettura è stato implementato in MATLAB & Simulink.

Grazie all'utilizzo di questi software è possibile testare la bontà del lavoro svolto prima di passare alla fase successiva, dove in funzione dei risultati ottenuti, tutto ciò che è stato simulato viene riportato nella realtà.

4.1 Interfaccia principale

I Subsystem che costituiscono l'interfaccia principale del modello sono:

- Driver
- Centralina
- Split Coppia
- Motori
- Batteria
- Veicolo

A completare il modello si ha anche un subsystem chiamato Scope dove al suo interno vengono raggruppati tutti i parametri principali da analizzare durante la simulazione, in modo da poter svolgere un'analisi e raccolta dati completa e ordinata.

Come si può notare in Figura 10, si può selezionare, attraverso dei selettori, il ciclo guida da far simulare alla vettura e la trazione da utilizzare.

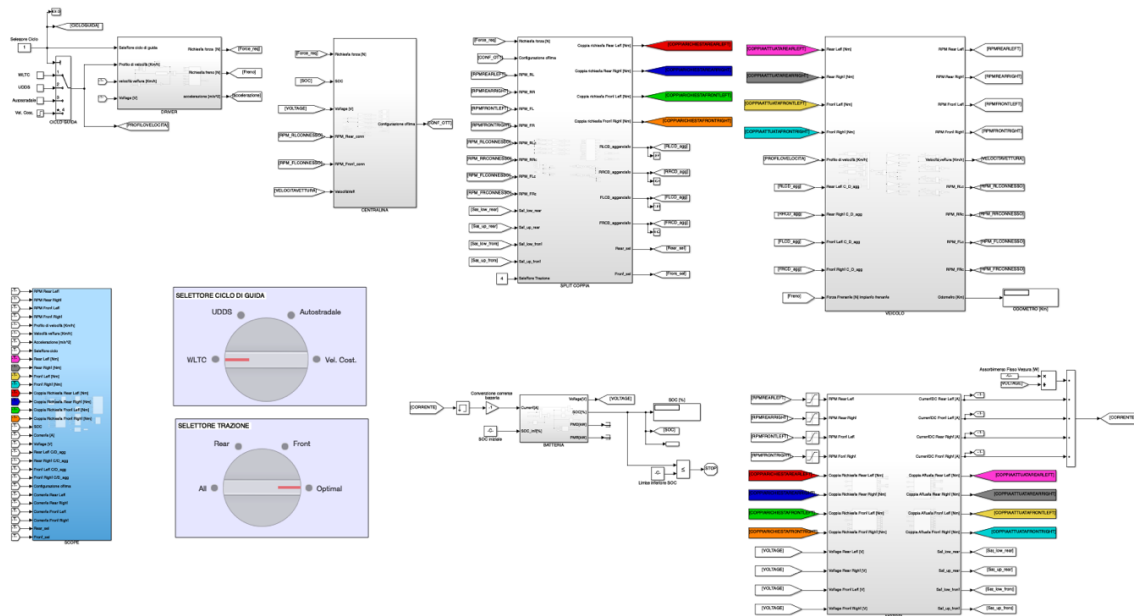


Figura 10 Interfaccia principale ambiente di simulazione

Per rendere il più generale possibile questo studio si è presa in considerazione un'architettura dove tutte le macchine elettriche della vettura possano essere a piacimento collegate o scollegate dalle ruote.

Sarà la centralina, sulla base dei parametri in input e della logica adottata, a gestire la coppia ai motori in funzione delle richieste da parte del guidatore.

Le configurazioni implementate sono:

- ALL-WHEEL DRIVE (Trazione Integrale). La vettura viene “forzata” ad operare con tutte e quattro le macchine elettriche con una ripartizione della coppia richiesta pari al 25% su ogni motore.
- REAR-WHEEL DRIVE (Trazione Posteriore). La vettura da quattro ruote motrici passa a due ruote motrici, quelle posteriori, ripartendo la coppia al 50% tra i due motori presenti sull'asse posteriore.
- FRONT-WHEEL DRIVE (Trazione Anteriore). E' solo l'asse anteriore a fornire la trazione necessaria, ripartendo la coppia al 50% tra i due motori corrispondenti.
- OPTIMAL. La vettura sfrutta la logica implementata in centralina al fine di garantire la miglior ripartizione di coppia tra gli assi.

4.1.1 Input necessari per la simulazione

Prima di procedere con la simulazione vengono caricati in MATLAB, tramite uno script (Launch), tutti i parametri necessari.

Come input per le simulazioni svolte sono stati utilizzati dei cicli di guida (WLTC, UDDS ed Autostradale) ed uno step a velocità costante, per simulare delle accelerazioni con successivo mantenimento a velocità costante partendo da fermi.

Tali cicli puntano a rappresentare tutti i possibili scenari quando si è alla guida di un'autovettura, rappresentando i tradizionali percorsi urbani, extraurbani e combinati.

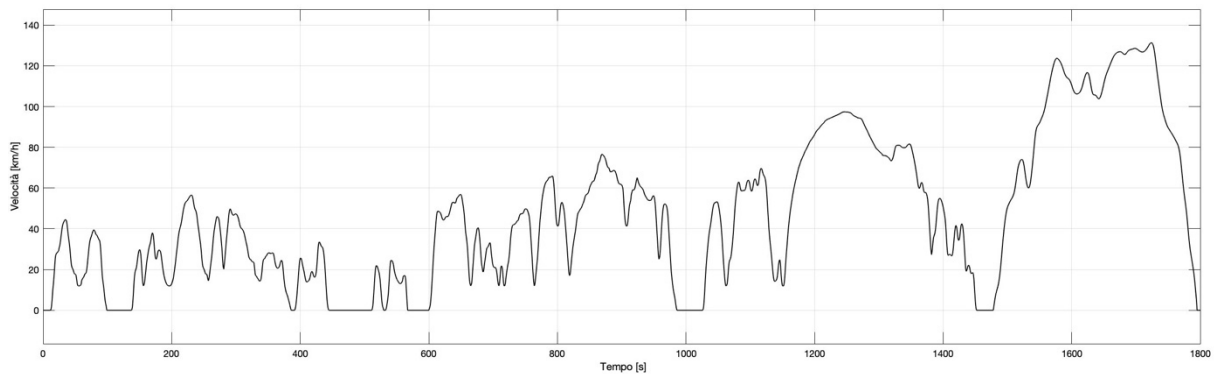


Figura 11 Ciclo di guida WLTC

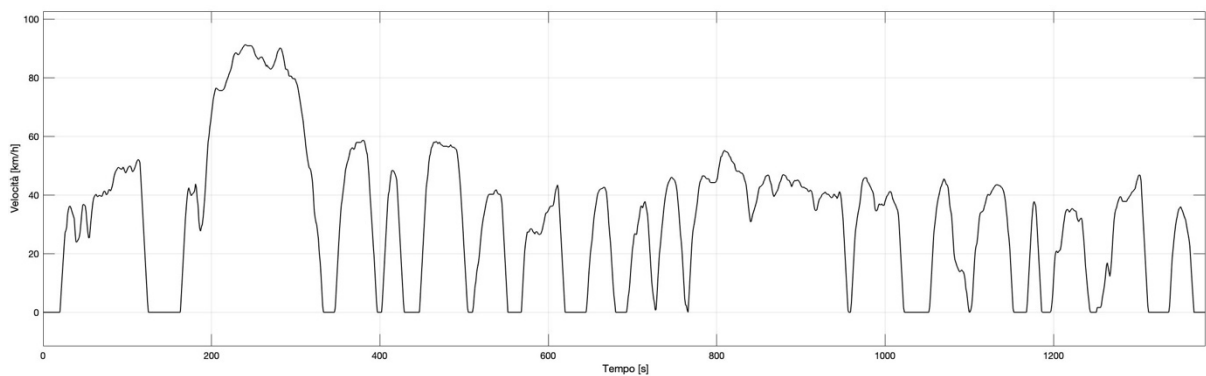


Figura 12 Ciclo di guida UDDS

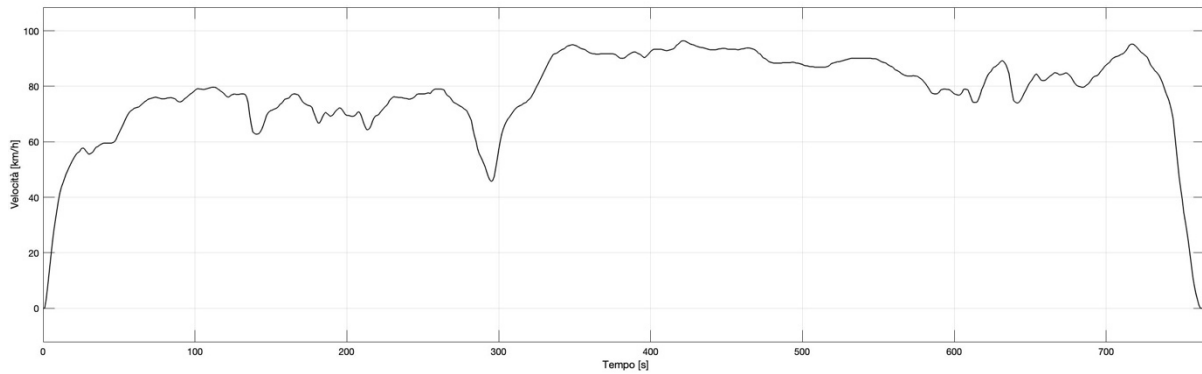


Figura 13 Ciclo di guida Autostradale

4.2 Driver

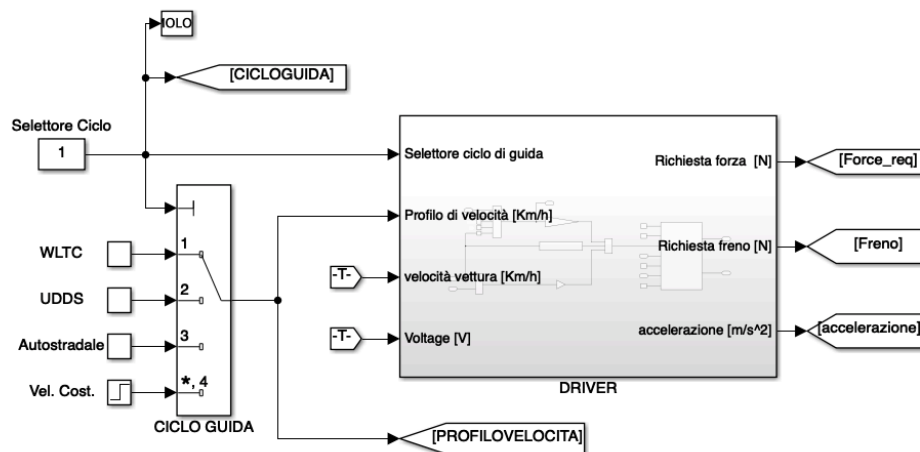


Figura 14 Esterno blocco Driver

Il compito del blocco “DRIVER” è quello di convertire il profilo di velocità che la vettura deve seguire per poter realizzare il ciclo di guida selezionato, in una richiesta di forza, simulando i pedali di acceleratore e freno.

Il blocco Driver riceve in input il selettore del ciclo selezionato, con rispettivo profilo di velocità, la tensione della batteria ed un feedback della velocità attuale della vettura, e restituisce in output i valori di richiesta forza motrice e frenante, da ripartire tra motori e impianto frenante, oltre al valore dell’accelerazione richiesta alla vettura.

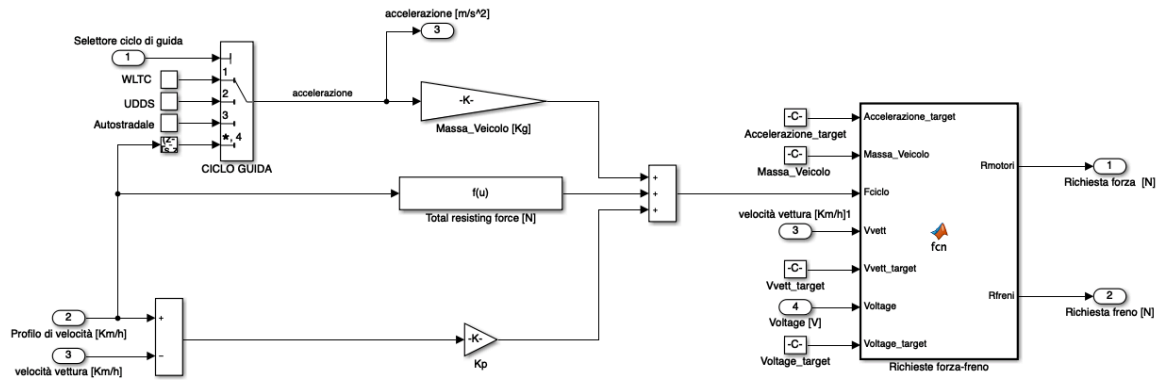


Figura 15 Interno blocco Driver

Come mostrato in Figura 15, all'interno del blocco driver, attraverso un Multi-Port Switch, in funzione del ciclo di guida, viene selezionata la relativa accelerazione, calcolata offline in MATLAB derivando il profilo di velocità, e poi caricata in Simulink.

Sfruttando il Secondo Principio della Dinamica $F = m * a$, noti i valori di accelerazione e massa della vettura, ricaviamo la forza necessaria a far accelerare il veicolo come richiesto dal ciclo, alla quale viene sommata la resistenza all'avanzamento, attraverso una cost function denominata "Total Resisting Force":

$$Total\ Resisting\ Force = a + b * v + c * v^2$$

dove a, b e c sono i coefficienti di coast down (tipicamente ricavati sperimentalmente attraverso un test effettuato su veicolo), e v è la velocità della vettura.

Tale forza rappresenta tutte le resistenze all'avanzamento che il veicolo incontra durante la marcia, come rotolamento degli pneumatici e resistenza aerodinamica.

Al fine di ricavare la forza richiesta per eseguire accuratamente il ciclo viene sommato anche un contributo correttivo in catena chiusa, che prende in input l'errore tra il target di velocità dato dal ciclo guida e la velocità effettiva alla quale si muove la vettura.

Una volta nota la richiesta di forza da dover soddisfare, attraverso la MATLAB function “Richieste forza-freno”, vengono elaborate le richieste ai motori e all’impianto frenante.

```
function [Rmotori,Rfreni] = fcn(Accelerazione_target, Massa_Veicolo, Fciclo,Vvett,Vvett_target, Voltage, Voltage_target)
    F_target= Massa_Veicolo*Accelerazione_target;
    if Fciclo<F_target && Voltage<Voltage_target
        Rmotori=F_target;
        Rfreni=-(Fciclo-Rmotori);
    elseif F_target<=Fciclo && Fciclo<0 && Vvett>=Vvett_target && Voltage<Voltage_target
        Rmotori=Fciclo;
        Rfreni=0;
    elseif F_target<=Fciclo && Fciclo<0 && Vvett<Vvett_target && Voltage<Voltage_target
        Rmotori=0;
        Rfreni=-Fciclo;
    elseif Voltage>=Voltage_target
        Rmotori=0;
        Rfreni=-Fciclo;
    else
        Rmotori=Fciclo;
        Rfreni=0;
    end
end
```

Figura 16 MATLAB function - Richiesta forza-freno

La funzione prende in input la forza richiesta dal ciclo, la velocità della vettura e la tensione della batteria.

Per la suddivisione delle richieste, viene calcolato un valore di forza (F_target) utilizzata come forza limite, al di sotto della quale la forza frenante non spetta più ai motori ma all’impianto frenante.

Dopo aver definito nello script di caricamento dati, i valori target di accelerazione ($Accelerazione_target$), tensione batteria ($Voltage_target$) e velocità vettura ($Vvett_target$), viene implementata la logica di suddivisione della richiesta da ripartire tra motori e impianto frenante.

L’idea è quella di utilizzare i motori non solo in fase di accelerazioni positive o nulle, ma anche in fase di accelerazioni negative, fino ad un certo valore target di decelerazione.

Nel caso di decelerazioni superiori, i motori erogano comunque la coppia frenante fino al target scelto, e la restante parte di decelerazione viene colmata dall’impianto frenante.

Ci sono però dei vincoli da tenere in considerazione: per velocità vettura inferiori ad un valore di riferimento e tensioni batteria superiori ad un certo limite, la frenata spetta solo ed esclusivamente all'impianto frenante.

4.3 Centralina

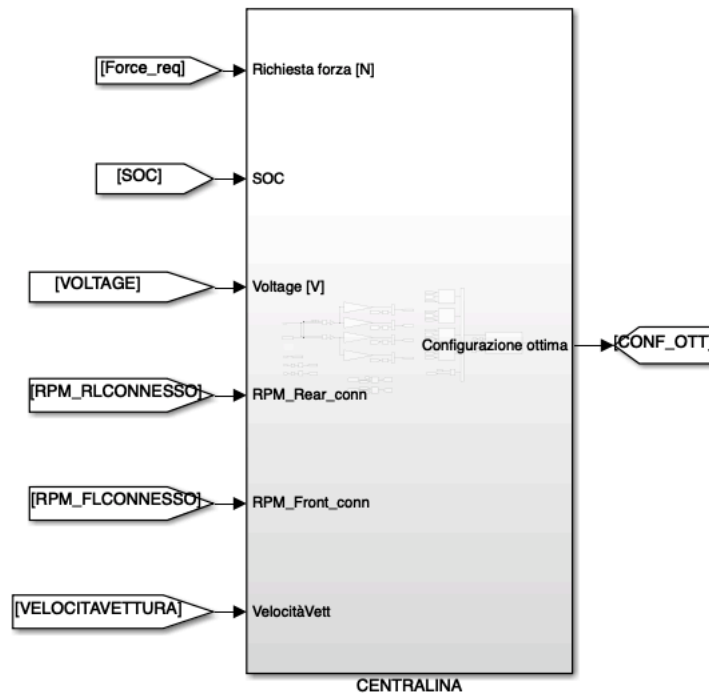


Figura 17 Esterno blocco Centralina

“CENTRALINA” è il cuore dell'intero progetto.

Tutte le logiche di gestione delle macchine elettriche vengono implementate al suo interno.

Riceve in input la forza richiesta ai motori per compiere il ciclo, gli RPM dei motori in funzione della velocità vettura, la tensione ed il SOC della batteria e la velocità vettura; per restituire come output la configurazione ottimale da attuare al fine di raggiungere l'obiettivo per il quale è stata creata la logica al suo interno.

In questa trattazione la logica implementata ha come obiettivo quello di ottimizzare la gestione delle macchine elettriche al fine di aumentare il range di chilometri percorsi con un ciclo di scarica della batteria, cioè partendo da batteria completamente carica a completamente scarica. Si vuole quindi ottenere la massima autonomia possibile.

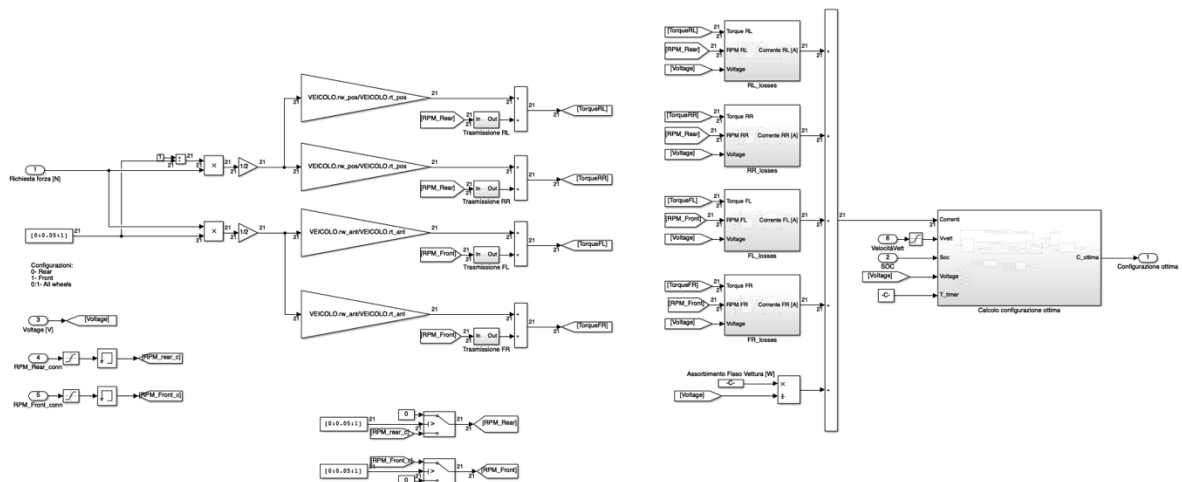


Figura 18 Interno blocco Centralina

La logica attuata si basa su una ricerca della corrente minima richiesta dai motori, e quindi alla batteria, per soddisfare le richieste date dal ciclo guida.

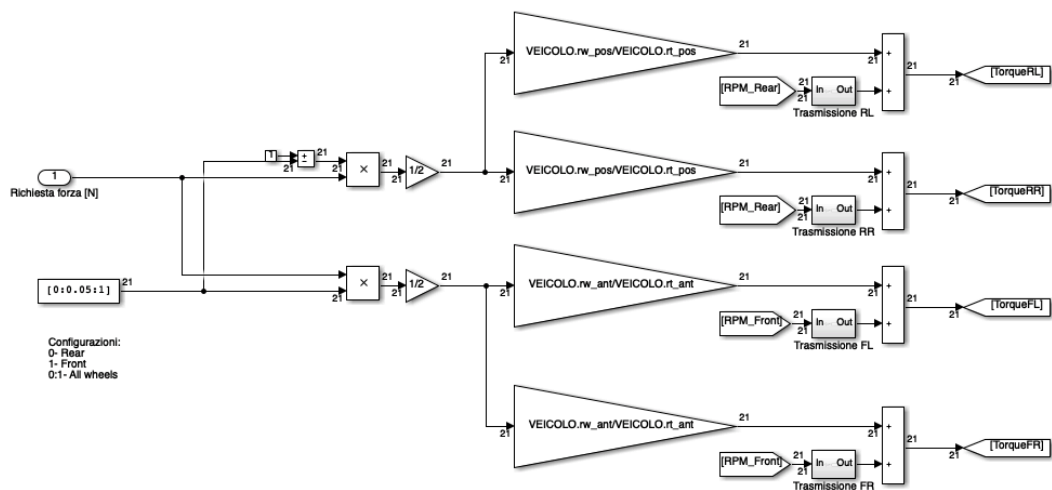


Figura 19 Calcolo coppia richiesta in centralina

Analizzando da sinistra a destra il modello in Figura 18, si nota come la forza richiesta dal ciclo venga convertita in una richiesta di coppia sfruttando un bilancio di potenze (con rendimento unitario) tra motore e ruota, considerando una trasmissione nel mezzo con rapporto di trasmissione noto (Figura 19).

$$Potenza\ in\ ingresso = Potenza\ in\ uscita \rightarrow C_{motore} * \omega_{motore} = C_{ruota} * \omega_{ruota}$$

Si avrà quindi

$$C_{motore} = \frac{Forza * Raggio\ ruota}{Rapporto\ di\ trasmissione}$$

In quanto $C_{ruota} = Forza * Raggio\ ruota$ e $Rapporto\ di\ trasmissione = \frac{\omega_{motore}}{\omega_{ruota}}$

Alla coppia necessaria per compiere il ciclo guida, viene sommata una coppia richiesta ai motori legata alle perdite da vincere per via della trasmissione, calcolata tramite una cost function denominata “Ctrasmissione”:

$$C_{trasmissione} = coefficiente * \omega_{motore}^2$$

Per il calcolo di tale coppia, si considerano le perdite proporzionali al quadrato della velocità angolare dei motori (all’interno dei subsystem “Trasmissione” in Figura 19 gli RPM in input vengono convertiti in rad/s).

Il tutto viene effettuato per ogni motore.

Per poter valutare la configurazione migliore da attuare in ogni istante, è stato inserito un vettore [0:0.05:1] che rappresenta tutte le possibili configurazioni attuabili:

- 0 la configurazione a trazione posteriore.
- 1 la configurazione a trazione anteriore.
- Tutti i valori compresi tra 0 ed 1 esclusi, con intervalli di 0.05, la configurazione a quattro ruote motrici, dove si ha la ripartizione della coppia tra i due assi.

Ad esempio, con la configurazione 0.4 si vuole rappresentare una situazione dove il 40% della coppia viene erogata dall'asse anteriore ed il 60% dall'asse posteriore.

Le configurazioni attuabili sono 21, e tutte e 21 vengono valutate nello stesso istante temporale, e solo quella che restituirà il minimo valore di corrente verrà presa in considerazione.

Al fine di ottenere meno perdite possibili, come vedremo in seguito, si è deciso di portare ad RPM nulli un motore quando non viene utilizzato per erogare coppia.

Tale decisione è stata presa valutando le perdite associate alla sola rotazione del motore, anche in caso di coppia erogata nulla.

Come mostrato in Figura 20, si inserisce quindi un valore di RPM pari a zero, nella valutazione della corrente relativa ad una configurazione dove tale motore non erogherà coppia per compiere il ciclo.

Si fa riferimento in particolare alle sole configurazioni 0 e 1.

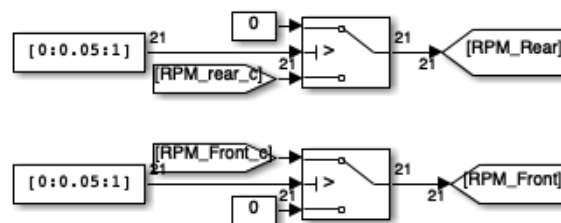


Figura 20 Selettore RPM in funzione della configurazione

Si può notare in Figura 21 come i valori analizzati per ogni istante temporale siano 21.

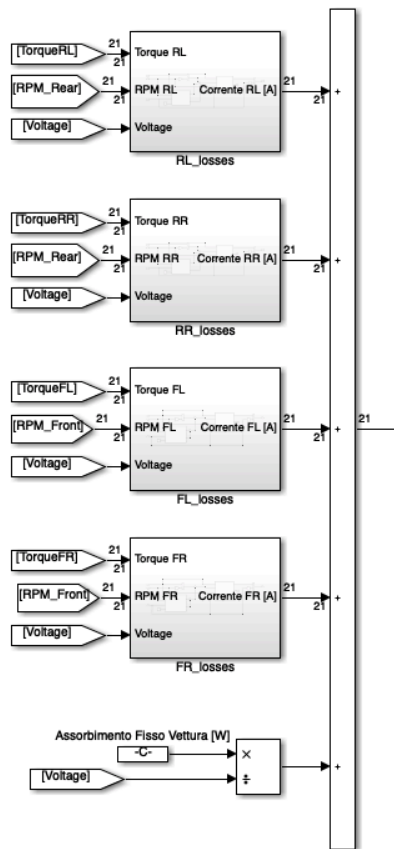


Figura 21 Ricerca delle correnti

Noti ora i 21 valori di coppia ed RPM, si utilizzano dei subsystem ("losses") dove all'interno sono implementate le perdite associate a ciascun motore, al fine di calcolare le 21 correnti richieste.

In Figura 21 si nota come in ingresso viene utilizzata la tensione della batteria, gli RPM del motore e le coppie, analizzando in ogni istante tutte e 21 le configurazioni possibili.

Verranno restituite in output le 21 correnti richieste dai motori, ognuna associata alla propria configurazione.

Le correnti richieste dai singoli motori vengono sommate tra loro, con l'aggiunta di un'ulteriore corrente legata agli assorbimenti fissi della vettura, quali ad esempio ausiliari o componenti dell'impianto vettura.

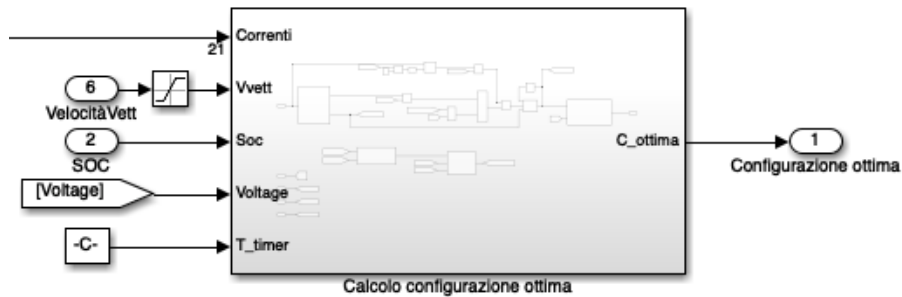


Figura 22 Esterno blocco Calcolo configurazione ottima

Una volta ottenuti i 21 valori di possibili correnti, attraverso il subsystem "Calcolo configurazione ottima" viene scelta la configurazione da attuare.

Si utilizzano in input oltre ai valori di corrente, la velocità vettura, lo stato della batteria (SOC e tensione) ed un parametro temporale (T_timer) impostato nel launch iniziale che verrà utilizzato per il confronto energetico tra due configurazioni differenti.

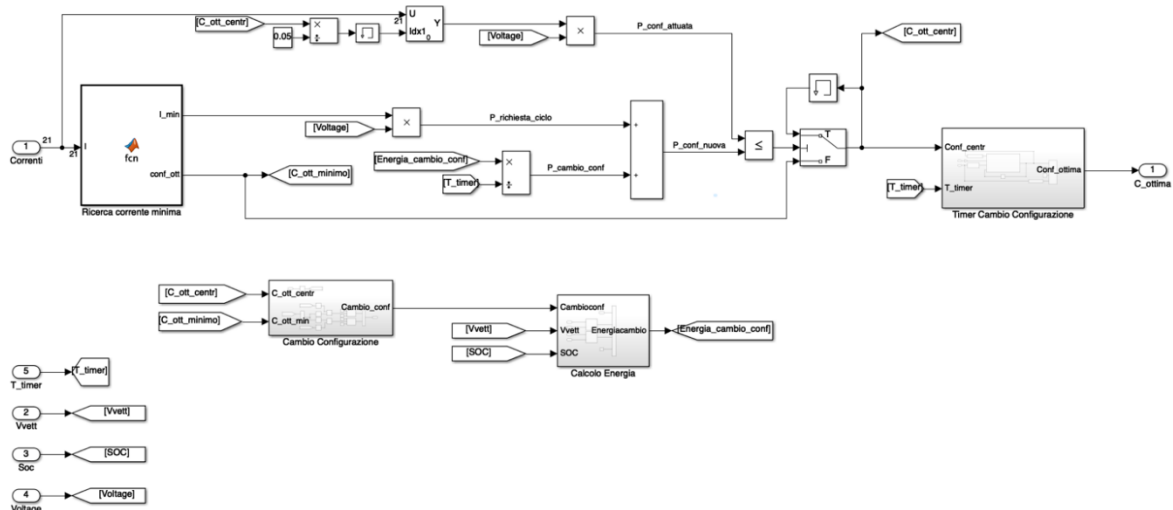


Figura 23 Interno blocco Calcolo configurazione ottima

Per l'analisi delle correnti, come si può notare in Figura 23, il primo step di calcolo viene svolto dalla MATLAB function “Ricerca corrente minima”, la quale, tra tutti i valori di corrente, individua il minimo con la relativa configurazione.

```
function [I_min,conf_ott] = fcn(I)
    [I_min,c_ott_indice]=min(I);
    Conf=[0:0.05:1];
    conf_ott=Conf(c_ott_indice);
end
```

Figura 24 MATLAB function - Ricerca corrente minima

Viene ora effettuato un confronto energetico, mostrato nella parte centrale di Figura 23, per valutare la convenienza del cambio configurazione.

Si calcola la potenza relativa alla nuova configurazione ($Potenza = Corrente * Tensione$), alla quale viene sommato un valore di potenza associato ad un eventuale cambio di configurazione.

Quest'ultimo valore è basato sul calcolo dell'energia spesa per tale cambio, analizzata nell'arco di tempo richiesto attraverso T_timer.

Si avrà quindi, che la potenza richiesta con la nuova configurazione sarà:

$$P_{nuova\ configurazione} = P_{richiesta\ dal\ ciclo} + P_{cambio\ configurazione}$$

Per il calcolo della potenza legata al cambio configurazione, si ha bisogno di individuare la tipologia di cambio che si vorrebbe effettuare.

Come mostrato in Figura 25, attraverso un confronto tra la configurazione attuata (C_ott_centro) e la nuova (C_ott_minimo), viene individuato uno scenario che identifica la cambiata.

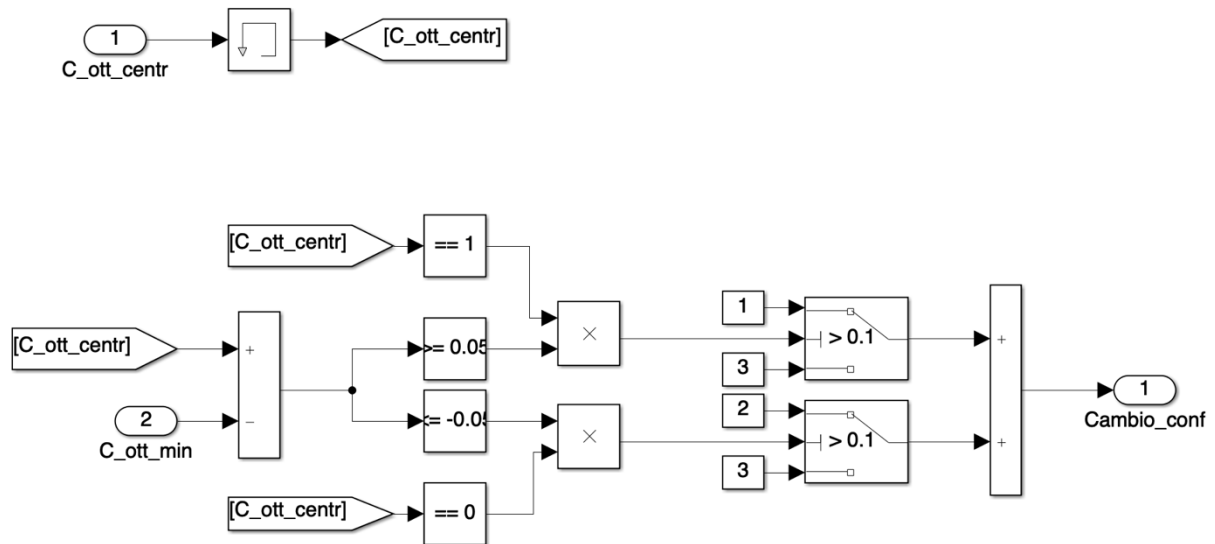


Figura 25 Interno blocco Cambio Configurazione

Individuato il cambio di configurazione potenziale, all'interno del subsystem "Calcolo Energia", grazie a delle mappe, si ha l'energia necessaria al cambio configurazione.

In tali mappe è racchiusa l'energia necessaria per portare un motore da RPM nulli ad un valore di RPM target per l'aggancio con la ruota, in funzione della velocità della vettura e del SOC (Figura 26).

Ovviamente l'energia spesa per il cambio configurazione è nulla nel caso di ripartizione di coppia quando si è in modalità quattro ruote motrici, in quanto essendo i motori tutti e quattro agganciati, non ci sarebbe nessuna energia spesa nei transitori di sincronizzazione con il target.

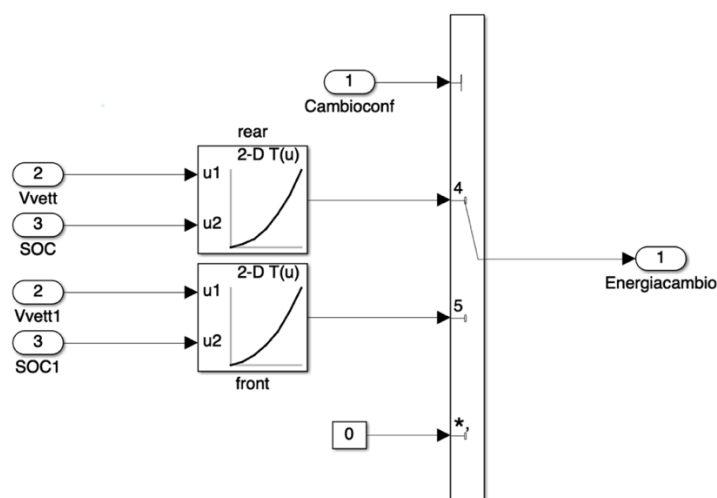


Figura 26 Interno blocco Calcolo Energia

L'implementazione appena descritta è rappresentativa della nuova configurazione potenziale; al fine di completare l'analisi, bisogna calcolare la potenza richiesta per compiere il ciclo, mantenendo la configurazione attuata.

Se la potenza richiesta con la configurazione attuale è minore o uguale della potenza totale richiesta dalla nuova configurazione (potenza ciclo con potenza cambio configurazione), non verrà effettuato alcun cambiamento, altrimenti si effettuerà il cambio di configurazione.

Si è notato, dalle simulazioni effettuate, che un cambio continuo di configurazione non sempre si traduce in perdite minime, in quanto secondo la logica implementata in SPLIT COPPIA, che analizzeremo più in dettaglio nel paragrafo successivo, quando ad un asse non è richiesta trazione, con conseguente disaccoppiamento dei motori dalla ruota, essi vengono portati a zero RPM, in modo da minimizzare le perdite legate alla loro sola rotazione.

Questo implica, però, un dispendio di energie per riportare i motori ad un valore di RPM prossimo ad un valore target per poter permettere un accoppiamento "sicuro" con la ruota, al fine di erogare la coppia richiesta dal ciclo guida nel caso di riaccoppiamento dell'asse.

Altro fattore non meno importante, da tenere in considerazione, è la spiacevole sensazione di guida che ne deriverebbe da un cambio configurazione continuo, oltre ai problemi legati all'affidabilità e all'usura dei componenti.

Si è implementato quindi un vincolo energetico (confronto tra potenze visto precedentemente), attraverso il quale il cambio di configurazione avviene se e solo se, energeticamente parlando, una nuova configurazione, alla quale viene aggiunta l'energia per movimentare i motori, è più vantaggiosa di quella attuata al momento.

Riassumendo, avremo quindi un confronto energetico tra la configurazione attuata e la configurazione che si vuole attuare sommata all'energia da spendere per raggiungere tale configurazione.

Si procederà al cambio di configurazione solo in caso di vantaggio energetico.

In questo modo si sono ridotti drasticamente i cambi di configurazione richiesti, migliorando notevolmente l'autonomia del veicolo, in quanto le perdite legate alla fase di sincronizzazione sono diminuite notevolmente.

In Figura 27 e 28, possiamo notare come la centralina sceglie la configurazione da inviare al Timer seguendo la logica appena descritta. Il ciclo guida utilizzato per mostrare in dettaglio l'implementazione nelle prossime due figure è il WLTC.

Figura 27:

Nel primo plot viene riportato in verde l'andamento del segnale di potenza sfruttando una nuova configurazione (comprensivo di potenza spesa per il cambio), in rosso l'andamento del segnale di potenza richiesta dal solo ciclo di guida con la nuova configurazione (trascurando la potenza spesa per andare in tale configurazione) ed in nero l'andamento del segnale di potenza richiesta dal solo ciclo di guida mantenendo la configurazione attuale.

Nel secondo plot viene riportato in rosso l'andamento della configurazione ottima derivante dalla MATLAB function (Ricerca corrente minima) ed in nero l'andamento della configurazione ottima derivante dal confronto di potenza appena descritto, che verrà inviata in ingresso al Timer.

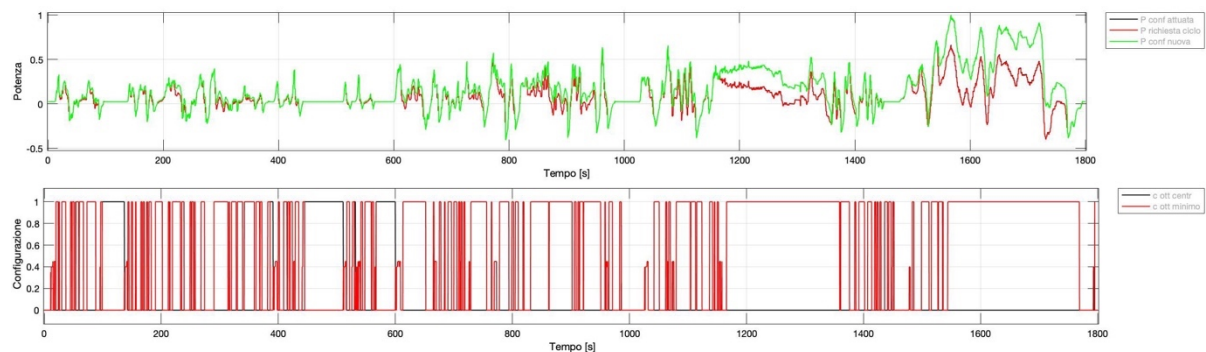


Figura 27 Potenze e Configurazioni Centralina - WLTC

Figura 28:

Viene riportata una parte di quanto appena mostrato, rendendo più evidente la logica descritta. Analizzando le configurazioni si nota come inizialmente sono entrambe su 0 (trazione posteriore), successivamente la MATLAB function calcolando la configurazione ottima

restituisce un valore diverso da 0, suggerendo la configurazione a quattro ruote motrici invece del solo asse posteriore, ciò implica il dover attivare l'asse anteriore.

Il motivo per cui la configurazione da attuare non cambia è legato alla potenza spesa per attivare l'asse anteriore che penalizza la potenza complessiva della nuova configurazione, impedendone quindi il cambio, anche nel caso in cui la sola potenza spesa per compiere il ciclo risulti minore, seppur di poco.

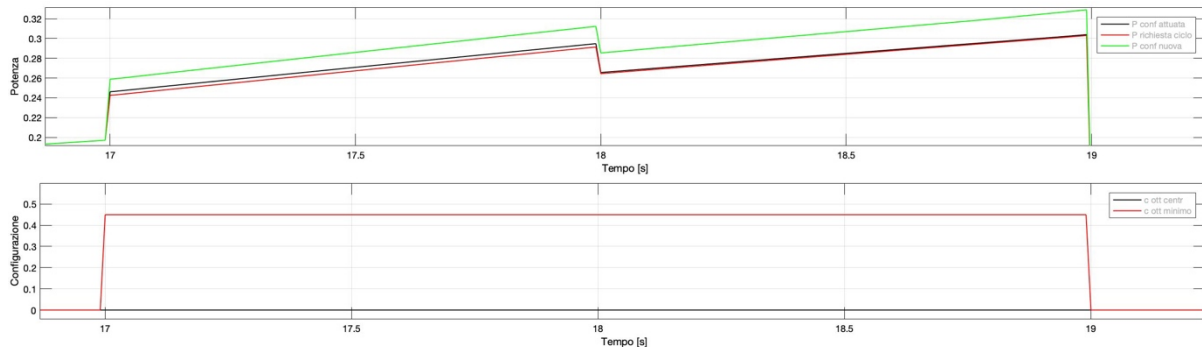


Figura 28 Dettaglio Andamento Potenze e Configurazioni Centralina – WLTC

E' stato inoltre implementato un timer, in modo da non permettere due cambi configurazione che implicano l'accoppiamento/disaccoppiamento di un asse troppo ravvicinato tra loro, anche se la centralina lo richiedesse.

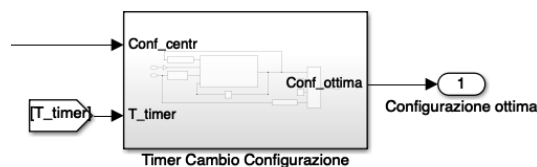


Figura 29 Esterno blocco Timer Cambio Configurazione

Il principio di funzionamento di questo timer è quello di impedire un cambio di configurazione prima di un determinato valore target.

Il subsystem “Timer cambio configurazione” legge la configurazione ottima (Conf_centra), ed in funzione di essa traccia uno scenario (Trazione Anteriore, Trazione Posteriore oppure Trazione Integrale) che deve essere mantenuto per il tempo richiesto (Figura 30).

Superato questo tempo il timer darà il via libera al cambio scenario, ricominciando a contare il tempo per permettere nuovamente un altro cambio.

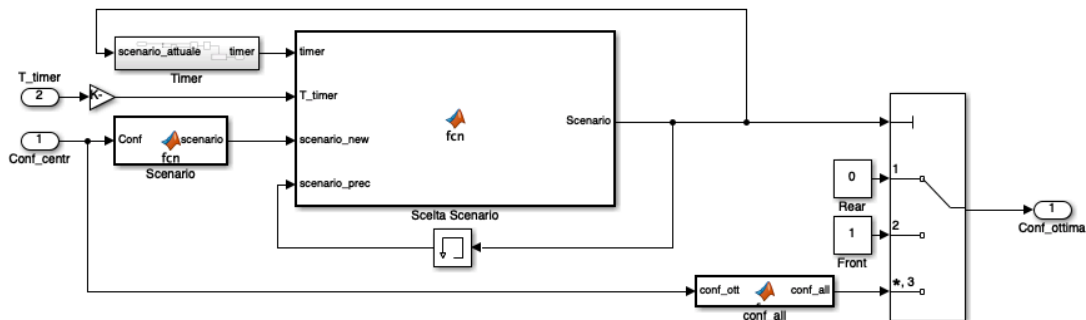


Figura 30 Interno blocco Timer Cambio Configurazione

Attraverso una serie di confronti tra i valori di configurazioni, viene definito lo scenario attuale. Tutto ciò, avviene all'interno della MATLAB function "Scenario".

```
function scenario = fcn(Conf)

    if Conf==1
        scenario=2;
    elseif Conf==0
        scenario=1;
    else
        scenario=3;
    end
end
```

Figura 31 MATLAB function - Scenario

Mentre, all'interno della MATLAB function "Scelta Scenario" viene deciso in funzione del valore del timer se cambiare scenario o meno.

```
function Scenario = fcn(timer,T_timer, scenariio_new,scenariio_prec)

    if timer<T_timer
        Scenario=scenariio_prec;
    else
        Scenario=scenariio_new;
    end
end
```

Figura 32 MATLAB function - Scelta Scenario

Il timer non è nient'altro che un subsystem dove in funzione del cambio scenario attuato, viene attivato un reset, permettendo al conteggio di ripartire.

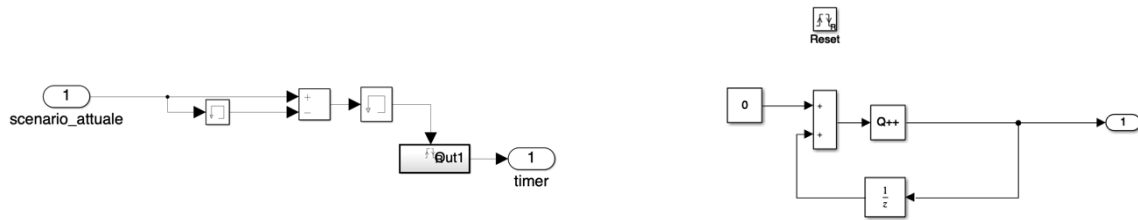


Figura 33 Interno blocco Timer ed interno contatore

Una volta deciso lo scenario, attraverso un Multi-Port Switch, si attua la configurazione voluta.

Avremo che scenario 1 indica la configurazione a trazione posteriore, scenario 2 indica la configurazione a trazione anteriore e scenario 3 indica la configurazione a trazione integrale. Nel caso di scenario 3, è stata implementata la MATLAB function “conf_all” per far mantenere la configurazione per il tempo richiesto, permettendo però la ripartizione della coppia tra gli assi in qualsiasi momento, seguendo le indicazioni della centralina.

Se centralina decidesse di cambiare scenario prima del tempo target, mentre si è ancora in scenario 3, fino al raggiungimento del tempo minimo la coppia verrà suddivisa equamente tra i due assi.

```
function conf_all = fcn(conf_ott)
    if conf_ott==1 || conf_ott==0
        conf_all=0.5;
    else
        conf_all=conf_ott;
    end
end
```

Figura 34 MATLAB function - Conf_all

Si è calcolata così la configurazione ottima da attuare.

Essa verrà utilizzata come input in split coppia per poter richiedere ai motori la coppia necessaria in accordo con tale configurazione.

4.4 Split Coppia

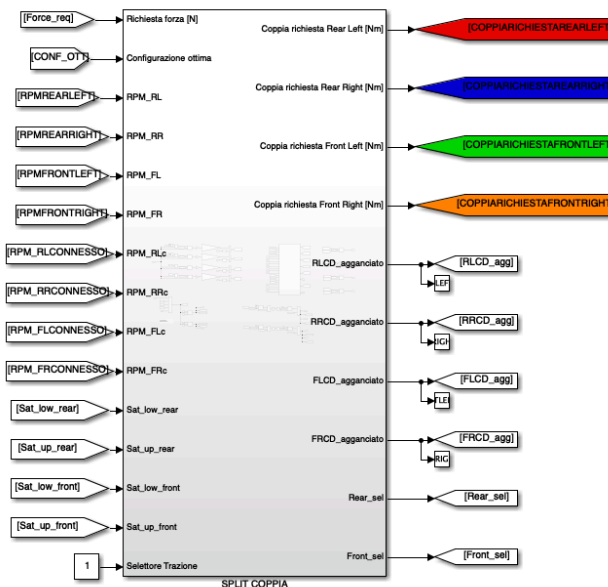


Figura 35 Esterno blocco Split Coppia

“SPLIT COPPIA” è il blocco che elabora le informazioni riguardanti la configurazione da attuare e le trasforma in richieste concrete ai motori.

Riceve in input la forza richiesta dal ciclo guida (proveniente dal blocco driver), la configurazione ottimale (calcolata dalla centralina), il selettore di trazione, i valori di RPM dei motori, ed i valori di coppia limite che i motori possono erogare istante per istante a seconda del punto di lavoro (provenienti dal blocco motori).

Restituisce in output i valori di coppia richiesta ai singoli motori, in funzione della configurazione attuata, ed il segnale di aggancio/sgancio per le frizioni posizionate tra motori e ruote, oltre al segnale di aggancio/sgancio ricevuto dalla centralina.

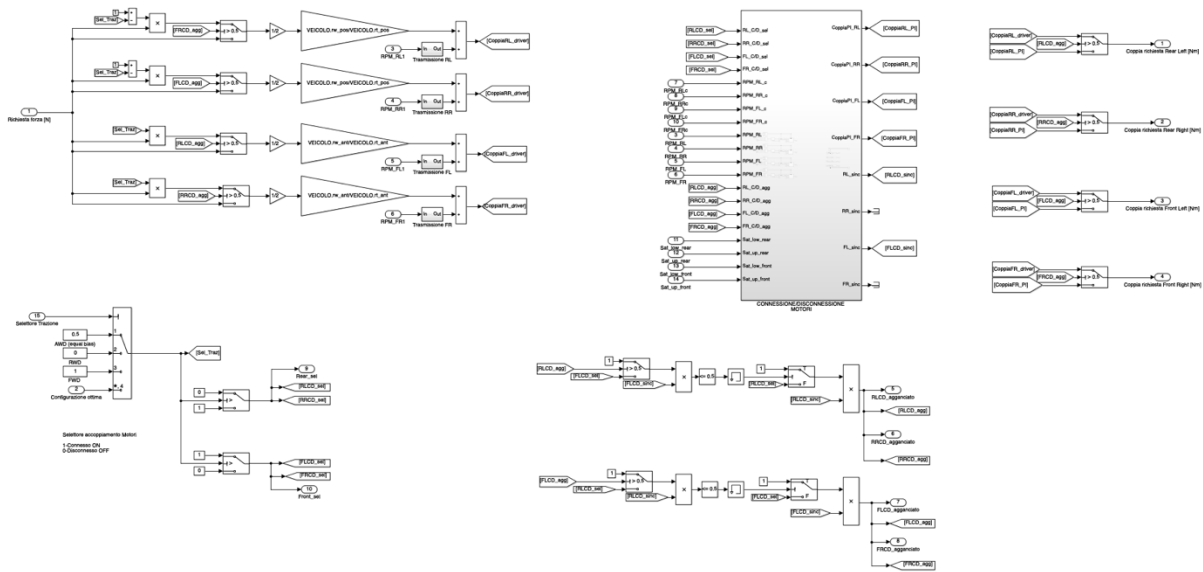


Figura 36 Interno blocco Split Coppia

Come si può osservare in Figura 36, all'interno di questo blocco viene implementata la dinamica del sistema in fase di aggancio/sgancio dei motori.

Analizzando l'interfaccia principale, nello specifico in basso a sinistra, si nota la logica implementata per convertire le richieste di configurazione della centralina in una configurazione attuata.

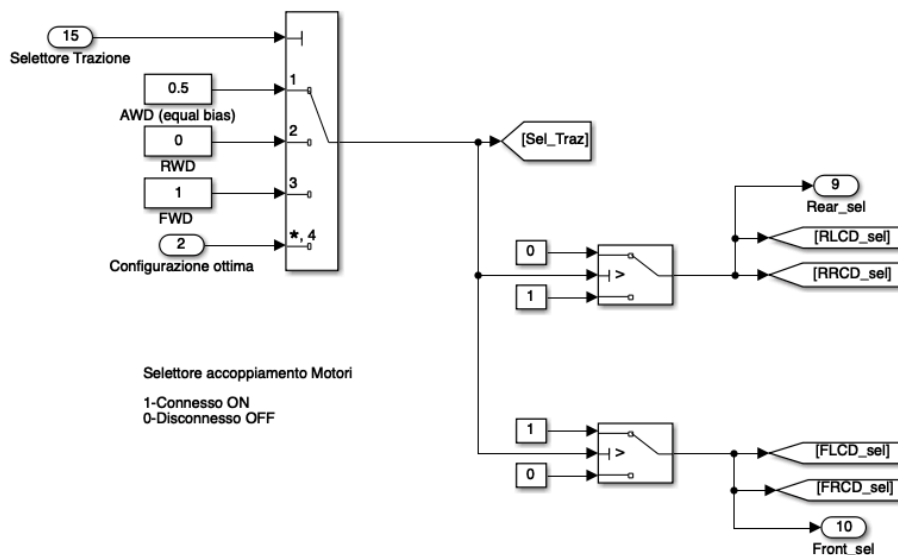


Figura 37 Logica selettore

Viene chiamata “SELETTORE” (sel) la richiesta di attivare o meno un asse per la trazione, in funzione di quella che è la configurazione voluta.

Attraverso un Multi-Port Switch daremo in input il segnale del selettore di trazione, che ci dirà se vogliamo “forzare” le configurazioni (trazione integrale, posteriore o anteriore), oppure vogliamo sfruttare l’ottimo calcolato da centralina (optimal).

L’attivazione degli assi attraverso i quali si vuole soddisfare la richiesta di coppia, avviene grazie ad una cascata di switch, dove si ha un confronto tra valori con il fine di riconoscere se si intende agganciare o sganciare un asse:

- Selettore uguale a 1, vogliamo che l’asse dia trazione.
- Selettore uguale a 0, vogliamo che l’asse non dia trazione.

Bisogna fare una precisazione: il cambio di configurazione è però possibile solo quando almeno un asse è in grado di fornire la coppia necessaria a compiere il ciclo guida.

Ad esempio, se si vuole passare da una configurazione a trazione posteriore ad una a trazione anteriore, bisogna prima portare l’asse anteriore ad una velocità per poter agganciarsi alla ruota, agganciarlo e solo dopo sganciare l’asse posteriore.

In questo modo si evitano dei vuoti di coppia, che seppur piccoli non sono ammissibili.

Per poter attuare tale logica, viene inserito un altro segnale da considerare chiamato “SINCRONIZZATORE” (sync), il quale indica se l’asse è pronto per l’aggancio:

- Sincronizzatore uguale a 1, l’asse in esame è pronto per essere agganciato, in quanto i suoi RPM sono all’interno di un valore target per l’attivazione della frizione.
- Sincronizzatore uguale a 0, l’asse non può essere ancora agganciato in quanto i suoi RPM sono al di fuori del valore target per l’attivazione della frizione.

Nel momento in cui il segnale del sincronizzatore darà esito positivo, il segnale “AGGANCIATO” si attiverà, attuando la configurazione richiesta.

Fino a quel momento rimarrà su zero, impedendo l’attuazione della configurazione.

Prendendo in esame una porzione di ciclo, si riesce a vedere in Figura 38 la logica di aggancio di un’asse:

in rosso è rappresentato il segnale del selettore, in nero il segnale della frizione ed in verde il segnale del sincronizzatore.

Inizialmente si hanno tutti e tre i segnali su 0, in quanto l’asse in esame è fermo e sganciato.

Quando la configurazione ottima richiede l’aggancio di tale asse si nota come il segnale selettore passa su 1, in questo modo i motori si portano alla velocità di rotazione per l’aggancio, e solo quando il segnale sincronizzatore è su 1, il segnale agganciato diventa uguale ad 1 permettendo l’accoppiamento con le ruote.

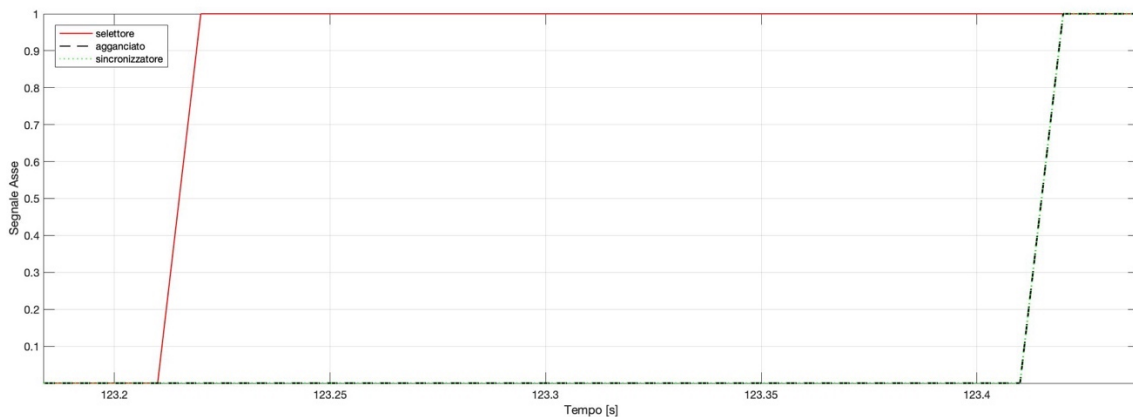


Figura 38 Segnale Asse Selettore – Agganciato – Sincronizzatore

Tale logica è nella parte centrale dell’interfaccia, vedi Figura 39, dove avviene il confronto tra i due assi, per evitare, come citato precedentemente, il vuoto di potenza tra due switch.

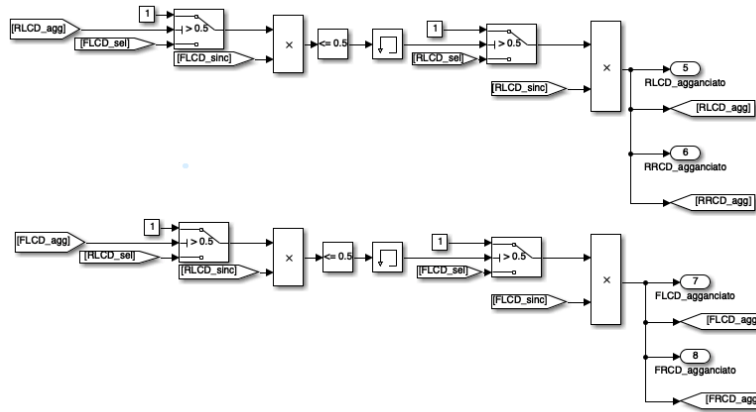


Figura 39 Confronto tra assi per il cambio configurazione

Ricapitolando: si sgancia un asse solo quando l'altro è già "pronto" ad erogare la coppia richiesta.

Sarà possibile quindi, un cambio di configurazione tra gli assi, solo quando l'asse inattivo è pronto a fornire la coppia richiesta dal ciclo.

Fino a quel momento se ne farà carico esclusivamente l'asse attivo.

Nella parte in alto a sinistra dell'interfaccia principale, si ha l'implementazione per il calcolo della richiesta di coppia ai motori per effettuare il ciclo guida.

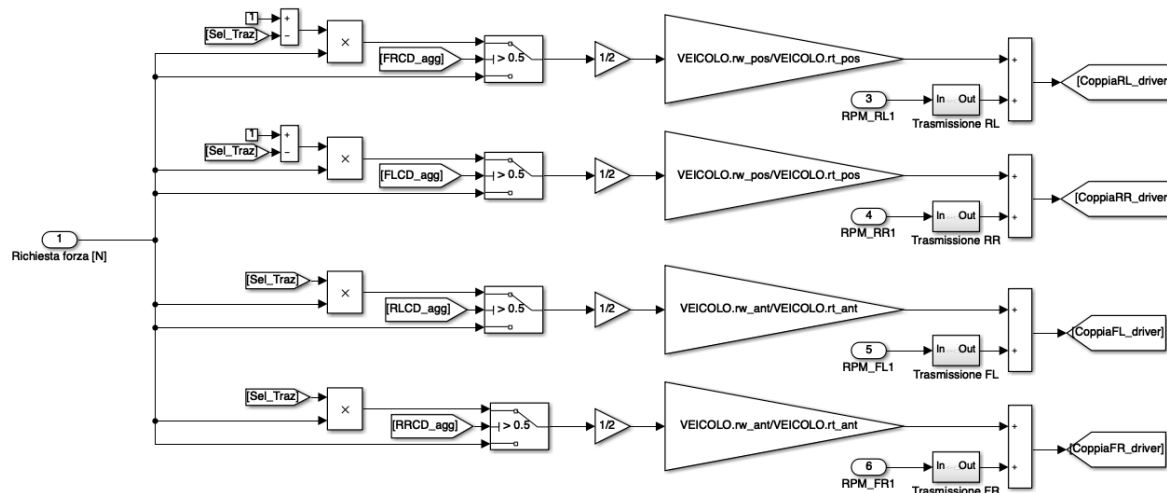


Figura 40 Calcolo coppia Driver

Prendendo in input la richiesta di forza (proveniente dal driver) e la configurazione che si vuole attuare, la coppia viene ripartita tra i motori agganciati in quell'istante.

Viene utilizzata la stessa logica vista nel paragrafo 4.3, con l'unica differenza che in split coppia viene calcolato un solo valore di coppia, in quanto la configurazione da analizzare per ogni istante è una, a differenza di quanto avviene in centralina, dove vengono analizzate tutte le 21 configurazioni possibili.

Come già anticipato nel paragrafo 4.3, una volta che i motori vengono sganciati dalle ruote, vengono portati a zero RPM.

La logica di controllo dei motori quando sono sganciati è implementata all'interno del blocco al centro di split coppia, denominato "CONNESSIONE/DISCONNESSIONE MOTORI".

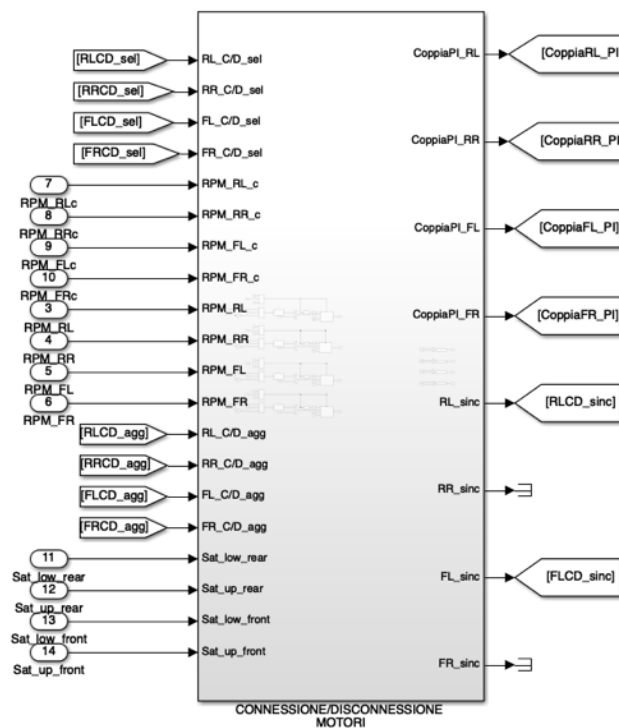


Figura 41 Esterno blocco connessione/disconnessione motori

Per la gestione dei motori quando sganciati si utilizzano in input i valori dei selettori, il segnale di aggancio delle frizioni, le coppie limite che i motori possono erogare, gli RPM effettivi delle macchine elettriche e gli RPM che avrebbero se fossero connessi con la ruota (funzione della velocità del veicolo), che d'ora in poi verranno chiamati RPM connesso per semplificare la trattazione.

Si effettuerà un controllo closed-loop della velocità di rotazione.

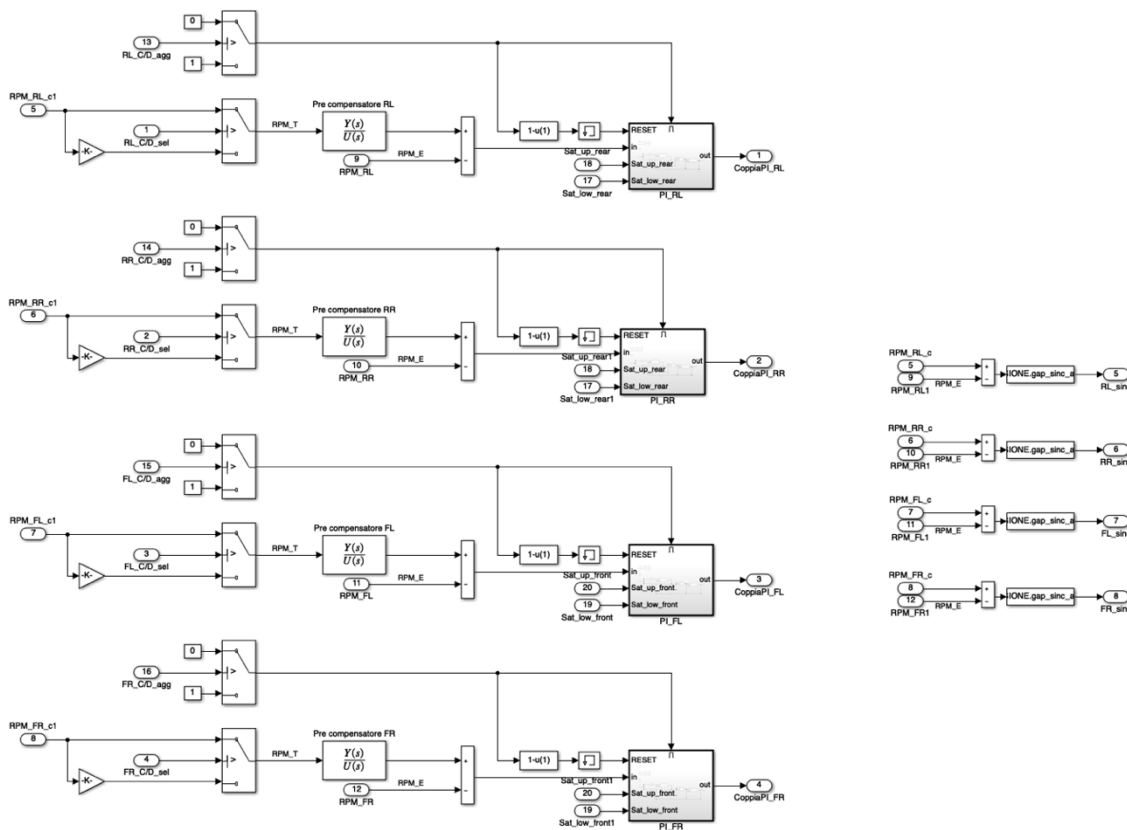


Figura 42 Interno blocco connessione/disconnessione motori

In Figura 42 viene mostrato l'interno di tale blocco.

Sulla destra viene implementata la logica per il segnale di sincronizzazione, confrontando le due velocità di rotazione RPM connesso ed RPM effettivo (Figura 43).

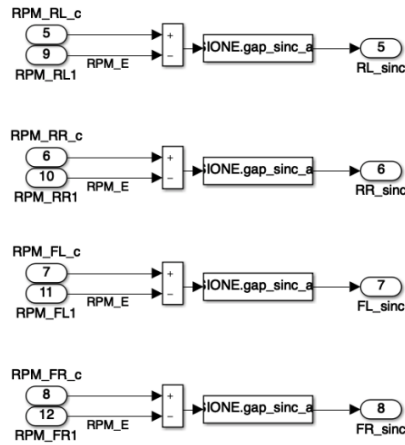


Figura 43 Logica sincronizzatore

Sulla sinistra viene implementata la gestione vera e propria dei motori quando disconnessi (Figura 44).

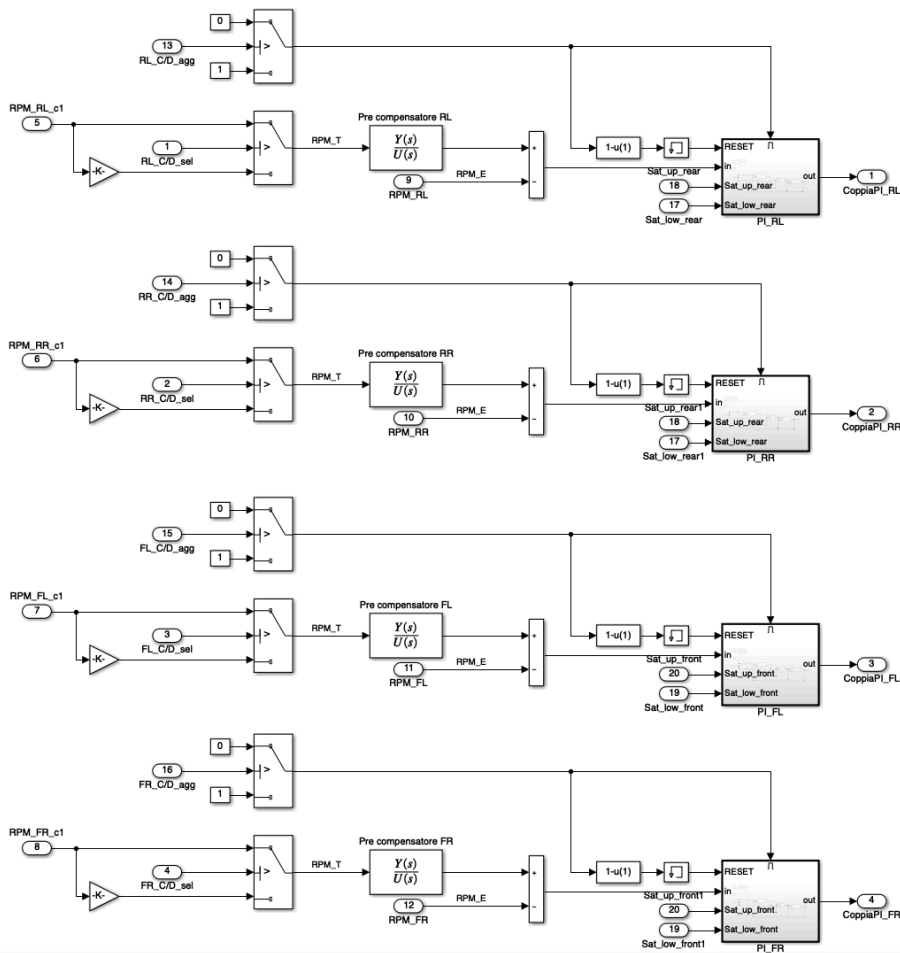


Figura 44 Logica gestione motori quando sganciati

Gli scenari possibili possono essere di due tipi:

- Fase di Aggancio
- Fase di Sgancio

In fase di aggancio, ai motori viene fornita una coppia positiva in modo da aumentarne la velocità di rotazione, fino ad arrivare al target che ne permette l'aggancio.

In fase di sgancio, ai motori viene fornita una coppia negativa in modo da portare a zero gli RPM nel minor tempo possibile.

Attraverso la modifica dei parametri all'interno dello script MATLAB, si ha inoltre la possibilità di modificare il target di RPM se la macchina elettrica è disconnessa, potendo scegliere un valore percentuale degli RPM connesso.

L'erogazione di coppia viene gestita da un Controllore PI (Proporzionale Integrale), mostrato in Figura 45.

L'errore di velocità in ingresso al PI varia in funzione del segnale selettore (sel):

- Selettore ON, il target di velocità è RPM connesso.
- Selettore OFF, il target di velocità è RPM nulli (si può notare nel modello un gain che moltiplica gli RPM connesso, utilizzato se si vuole invece far inseguire un target che sia una percentuale degli RPM connesso).

Il Target di velocità selezionato entra in un pre-compensatore, ovvero un contributo in catena aperta utilizzato per aiutare il PI specialmente in fase di aggancio, in modo da facilitare l'inseguimento del riferimento nel caso in cui esso vari molto rapidamente.

L'attivazione o meno del controllore è invece gestita dal segnale di aggancio delle frizioni, tramite un enable sul blocco:

- Agganciato ON, Controllore disattivato
- Agganciato OFF, Controllore attivato

Inoltre, è stato aggiunto anche un reset in modo da azzerare il controllore ogni volta che viene attivato e disattivato.

In questo modo ci assicuriamo che esso funzioni solo quando il motore è sganciato, senza tenere memoria di quello che è avvenuto precedentemente.

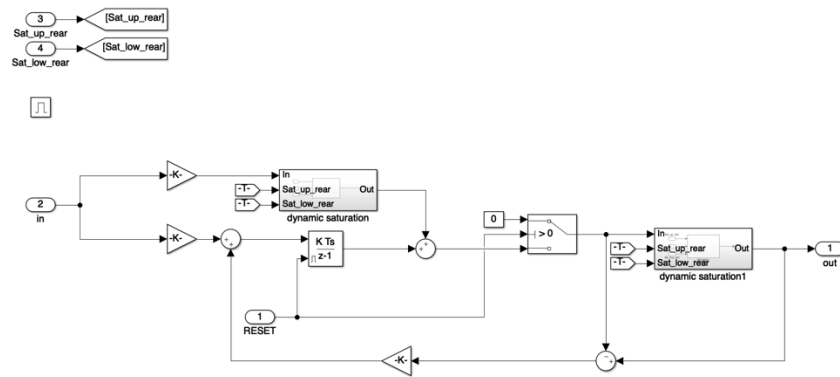


Figura 45 Interno controllore PI Rear

Durante l'implementazione del PI, è stato necessario pensare ad un controllo Anti Wind-Up Integrale, per evitare di avere delle sovraelongazioni legate alla saturazione degli attuatori, che in questo caso sono i motori.

Inoltre, sono stati aggiunti dei Saturatori Dinamici permettendo la variazione istante per istante dei limiti raggiungibili:

- Limite superiore, coppia massima istantanea in modalità motore.
- Limite inferiore, coppia massima istantanea in modalità generatore.

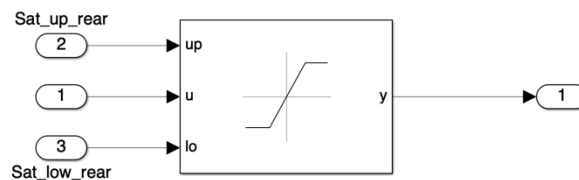


Figura 46 Interno blocco Saturatori Dinamici

Note ora tutte le coppie richieste ai motori, la parte destra dell'interfaccia generale di split coppia provvederà, in funzione del segnale di aggancio delle frizioni, a fornire ai motori la giusta richiesta in funzione della configurazione scelta:

- Segnale Agganciato ON, viene richiesta ai motori la coppia per compiere il ciclo guida (Coppia_driver).
- Segnale Agganciato OFF, viene richiesta ai motori la coppia calcolata in funzione dello scenario, se si è in fase di aggancio o sgancio del motore (Coppia_PI).

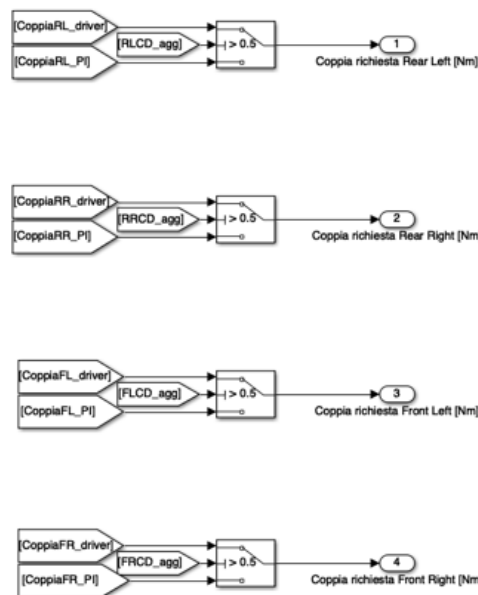


Figura 47 Logica coppia richiesta ai motori

Tale coppia, sarà ora presa in consegna dai motori.

4.5 Motori

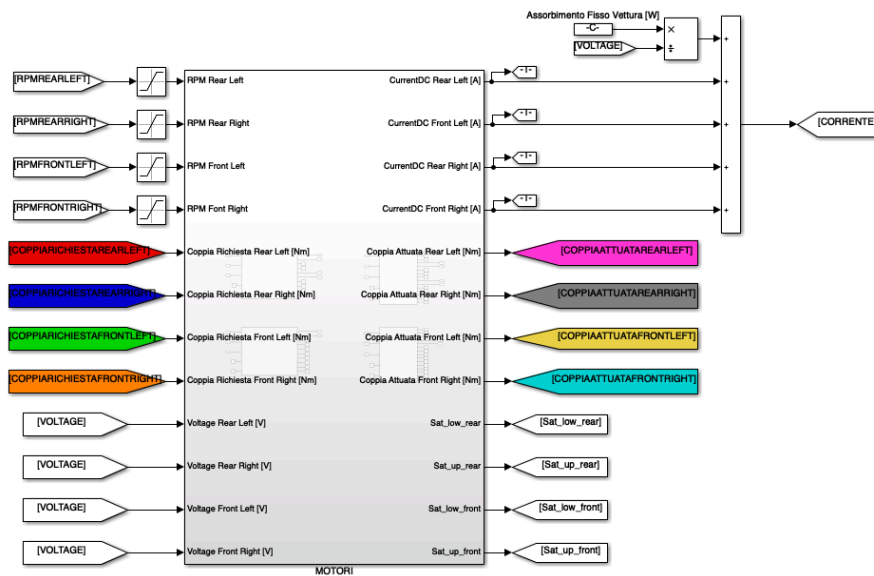


Figura 48 Esterno blocco Motori

Il blocco “MOTORI” è il blocco che ci permette di soddisfare le richieste del driver, in quanto le macchine elettriche forniscono la trazione necessaria a movimentare la vettura.

In input riceve la tensione della batteria, la coppia richiesta e gli RPM effettivi.

In output si ha la coppia massima istantanea (utilizzata in split coppia), i valori di corrente richiesti dai motori alla batteria (in aggiunta si ha l’assorbimento fisso già analizzato nel paragrafo 4.3) ed i valori di coppia attuata, cioè la coppia effettiva che i motori riescono a fornire, considerando tutte le perdite al suo interno.

Ovviamente i valori di coppia attuata soddisfano le richieste, altrimenti non si riuscirebbe ad eseguire ciò che viene richiesto dal driver; il tutto nei limiti delle macchine elettriche.

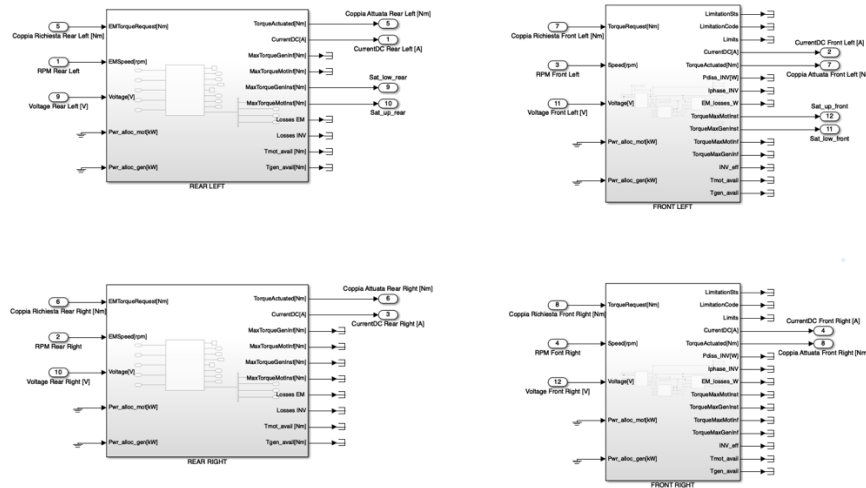


Figura 49 Interno blocco Motori

I valori di coppia attuata verranno utilizzati all'interno del blocco veicolo, mentre il valore di corrente viene utilizzato in batteria.

4.6 Batteria

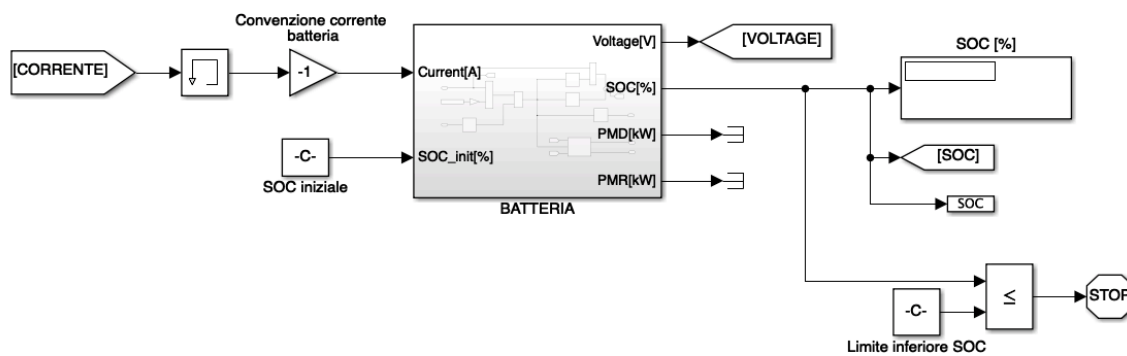


Figura 50 Esterno blocco Batteria

Il blocco “BATTERIA” prende in input il valore di corrente proveniente dai motori ed il valore di SOC iniziale, e fornisce in output la tensione e lo State Of Charge attuale.

Quando il SOC attuale arriva ad un valore imposto a simulare la batteria scarica, la simulazione si arresterà.

E' stato inserito un display per poter monitorare in tempo reale lo stato di carica della batteria.

Si può notare come per la convenzione dei segni all'ingresso della batteria è stato inserito un gain per invertire il segno del segnale di corrente.

Questo perché se la macchina elettrica è in modalità motore, la corrente sarà positiva, quindi in batteria arriverà una corrente negativa, che simulerà la scarica della batteria; viceversa, se la macchina elettrica è in modalità generatore, la corrente sarà negativa, quindi in batteria arriverà una corrente positiva, che simulerà la ricarica della batteria.

Il tutto nei limiti della batteria.

4.7 Veicolo

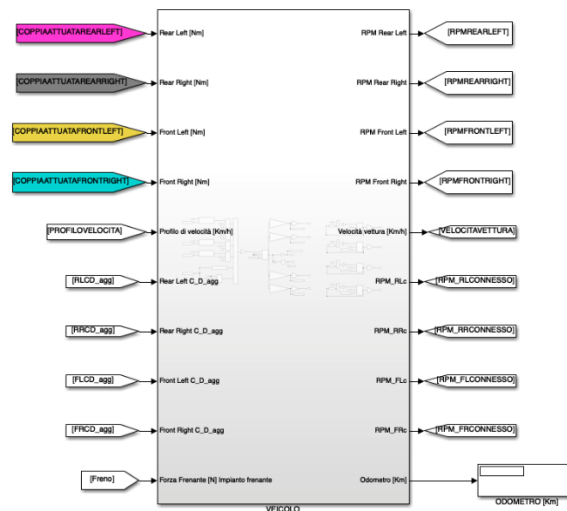


Figura 51 Esterno blocco Veicolo

Il blocco “VEICOLO” viene utilizzato per riprodurre il comportamento della vettura una volta che i motori erogano la coppia richiesta dal ciclo guida, restituendo un feedback in termini di velocità vettura, ad indicarci la bontà dell'ambiente di simulazione modellato, permettendo così di valutare il comportamento della Supercar in esame.

In input si hanno le coppie attuate dai motori, il profilo di velocità da seguire, il segnale di aggancio delle frizioni e il valore della forza relativo all'impianto frenante.

In output si hanno gli RPM connesso, gli RPM effettivi, la velocità della vettura ed un odometro per poter monitorare in tempo reale i chilometri percorsi dall'automobile.

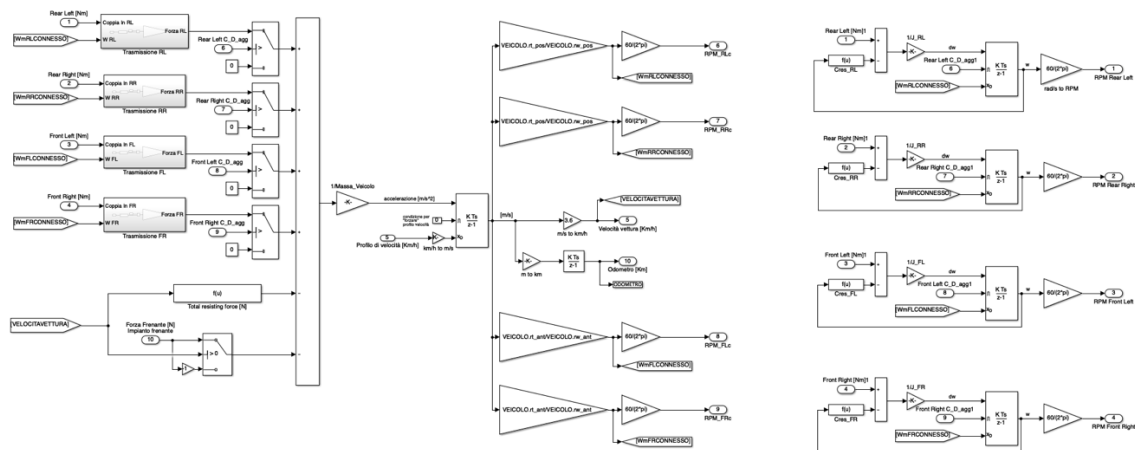


Figura 52 Interno blocco Veicolo

In Figura 52, viene mostrata l'interfaccia principale del blocco.

Sulla sinistra viene calcolata la velocità vettura ed i relativi RPM delle macchine elettriche (Figura 53).

Per ricavare la velocità vettura si effettua un'inversione del modello:

a partire dalle coppie ai motori, si ricavano le forze alle ruote, e sfruttando il Secondo Principio della Dinamica, si calcola l'accelerazione che integrata ci fornisce la velocità.

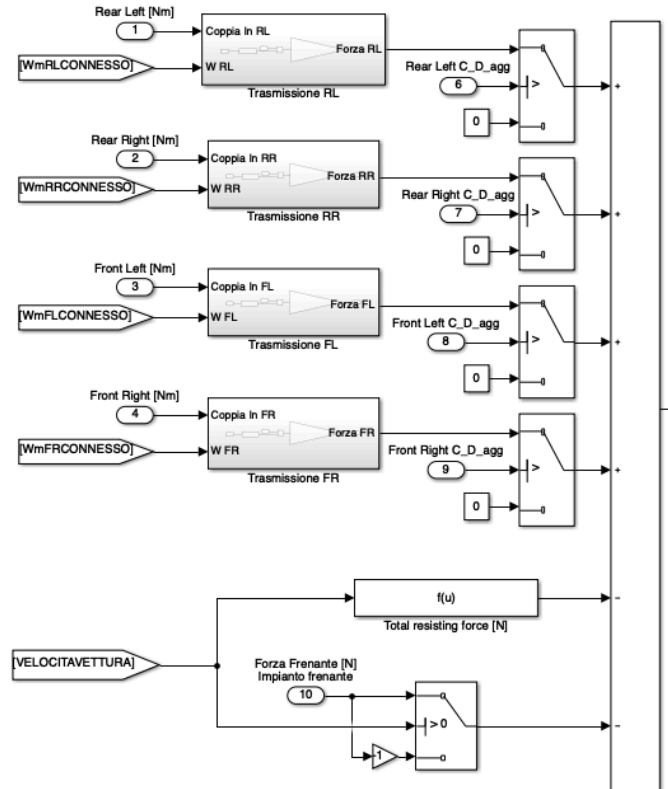


Figura 53 Logica inversione modello - Calcolo Forza

Nel caso di motore sganciato dalla ruota, si può notare dagli switch sulla sommatoria di forze che il termine relativo a quel motore è nullo. Viceversa, in caso di motore agganciato, il termine è quello corrispondente alla coppia attuata dal motore al netto della coppia persa a causa della trasmissione.

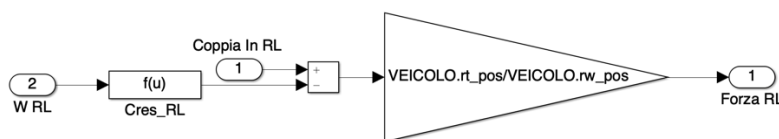


Figura 54 Interno blocco Trasmissione Rear Left

Si può notare come prima di effettuare l'inversione del bilancio di potenze visto nel paragrafo 4.3, viene penalizzata la coppia attuata dal motore di un termine corrispondente alle perdite della trasmissione, calcolato come nel paragrafo 4.3.

Nell'effettuare un bilancio di forze agenti sul veicolo (Figura 53), viene sottratta la Total Resisting Force (calcolata nel paragrafo 4.2) e la forza relativa all'impianto frenante, ricavata dalla MATLAB function (Richiesta forza-freno) all'interno del blocco driver.

Si nota un gain che inverte il segno di tale forza, nel caso in cui la velocità vettura risultasse minore di zero (retromarcia).

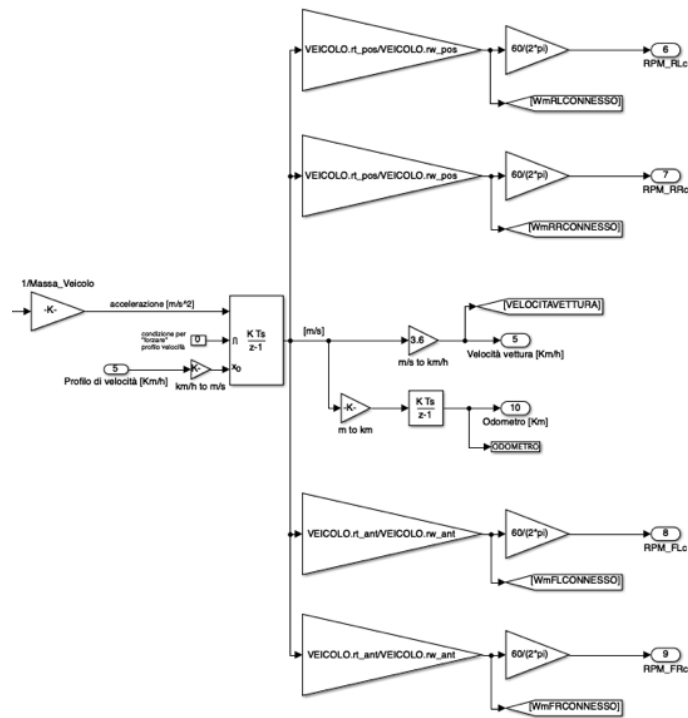


Figura 55 Logica inversione modello - Calcolo Velocità Vettura

Successivamente, una volta calcolata la forza totale, invertendo il Secondo Principio della Dinamica, ed integrando l'accelerazione, si ricava la velocità vettura (Figura 55).

Nota ora la velocità vettura, conoscendo i raggi ruota ed il rapporto di trasmissione, si è in grado di ricavare il valore di RPM connesso dei singoli motori.

Per completare l'analisi, quando invece la macchina elettrica risulta sganciata dalla ruota, si attiva la parte destra dell'interfaccia del modello veicolo (Figura 56).

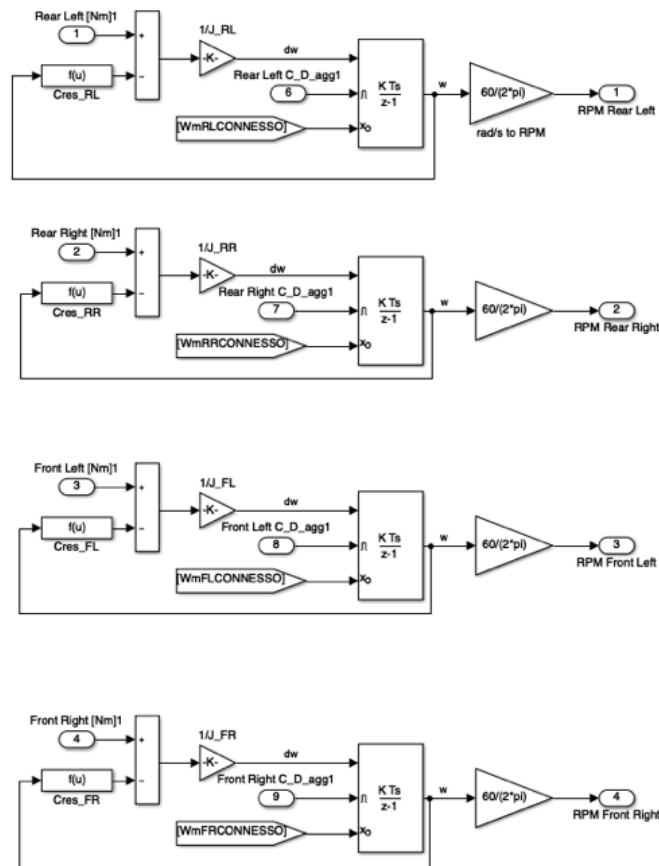


Figura 56 Calcolo RPM motori quando sganciati

Per il calcolo degli RPM effettivi a macchina sganciata, si utilizza l'Equazione di Equilibrio Dinamico del Sistema:

$$C_{motrice} - C_{resistente} = J * \dot{w}$$

Considerando: $C_{motrice}$, la coppia attuata dal motore in funzione della configurazione (fase di aggancio o sgancio), $C_{resistente}$, la coppia legata alla trasmissione come visto precedentemente, J , l'inerzia del sistema motore più trasmissione ed \dot{w} , l'accelerazione angolare del motore.

Ricavando \dot{w} , ed integrandola, si ha la velocità angolare che verrà poi convertita in RPM.

Sull'integrale per il calcolo di w , è stato impostato un enable che permette di non effettuare il calcolo in caso di motore agganciato:

- Se il segnale di aggancio è ON, l'enable dell'integrale fa sì che il calcolo venga bypassato e gli RPM effettivi coincidono con gli RPM connessi.
- Se il segnale di aggancio è OFF, l'enable dell'integrale fa sì che il calcolo venga effettuato, fornendo il valore degli RPM effettivi del motore quando esso è sganciato.

E' stata così completata l'implementazione del veicolo.

Tale blocco è fondamentale per la verifica del corretto funzionamento del modello, in quanto la velocità della vettura, confrontata con il profilo di velocità imposto dal ciclo guida, deve risultare praticamente uguale, lasciando spazio ad un minimo errore (ordini di grandezza piccoli) lontano anche dal singolo km/h, dovuto alle sole semplificazioni matematiche che inevitabilmente un software di calcolo attua.

In caso contrario, il modello non può essere ritenuto affidabile.

4.8 Scope

I blocchi fondamentali per il funzionamento dell'ambiente di simulazione sono stati tutti elencati.

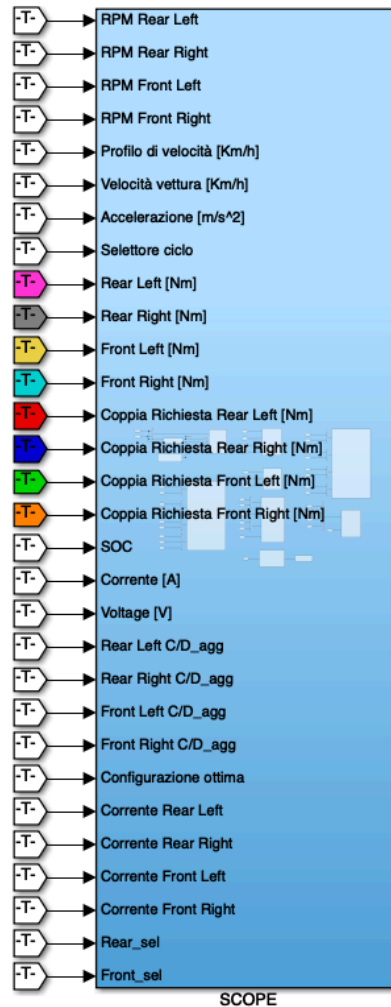


Figura 57 Esterno blocco Scope

Il blocco “SCOPE”, sembrerebbe meno importante, ma in realtà ha un ruolo determinante nell'individuare un errore, o un comportamento anomalo da parte del modello; oltre alla sua funzione di raccolta dati.

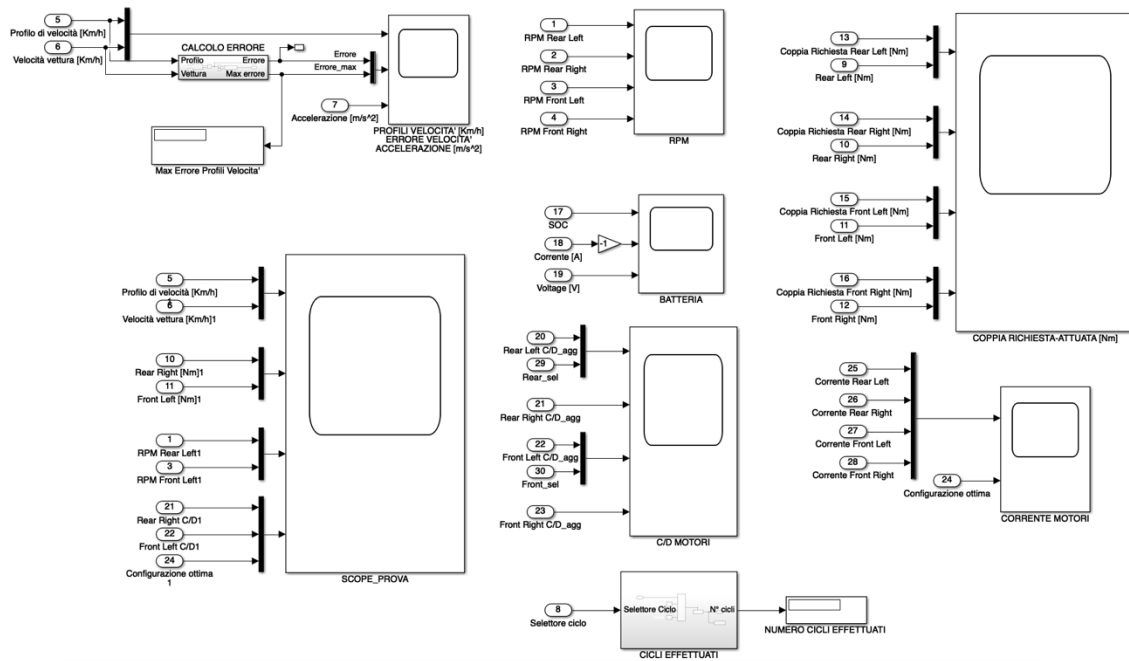


Figura 58 Interno blocco Scope

Esso prende in input tutti i parametri da monitorare durante la simulazione, numero di giri delle macchine elettriche, coppia richiesta ed attuata dai motori, velocità e accelerazione vettura, ciclo guida da eseguire, parametri della batteria quali SOC, tensione e corrente, configurazione ottima calcolata dalla centralina e segnali di aggancio/sgancio delle frizioni.

Attraverso degli scope (grafici in funzione del tempo) ci permette di monitorare in tempo reale l'andamento delle suddette variabili ed effettuare tutti gli studi del caso.

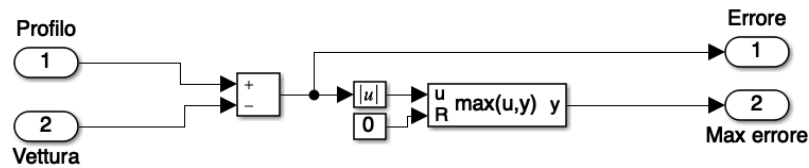


Figura 59 Interno blocco Calcolo Errore

In Figura 59, viene mostrato l'interno del subsystem "Calcolo errore" (in alto a sinistra nell'interfaccia principale).

Il compito di calcolare e plottare i valori di errore istante per istante, ed errore massimo, tra il profilo di velocità e la velocità vettura, sono assegnati a tale blocco.

E' stato inoltre inserito un display al fine di visualizzare il valore di errore massimo.

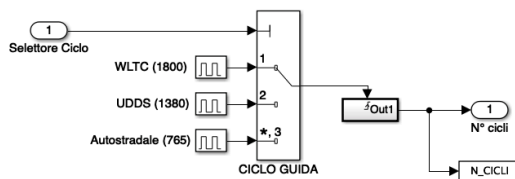


Figura 60 Interno blocco Cicli Effettuati

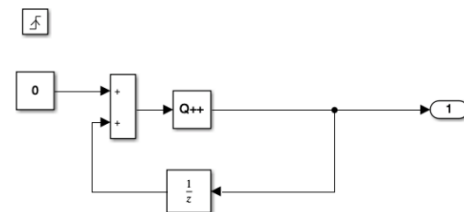


Figura 61 Trigger Cicli Effettuati

In Figura 60, viene mostrato l'interno del subsystem "Cicli Effettuati" (in basso nell'interfaccia principale).

Lo scopo di tale blocco è quello di calcolare quante volte percorriamo un ciclo durante la simulazione.

Esso si basa su un sistema di Trigger conoscendo la durata di ogni ciclo di omologazione assegnato.

CAPITOLO 5: SIMULAZIONE E ANALISI DATI

Come già accennato precedentemente, la fase di simulazione è fondamentale per lo sviluppo di un progetto.

Quest'ultima ci permette di valutare la risposta del sistema in funzione di determinati input. In questo modo si riesce a fare a meno di una prima fase di prototipazione del sistema, risparmiando tempo e denaro.

Una simulazione viene ritenuta valida nel momento in cui gli output del modello sono gli stessi che avrebbe il sistema reale, o molto vicini.

Durante il lavoro svolto, prima di passare all'implementazione della logica di gestione delle macchine elettriche è stato validato il modello creato, in modo da essere certi che i dati analizzati in futuro risultino corretti, affrontando comunque lo studio con spirito critico.

A tal proposito, nel corso della modellazione dell'ambiente di simulazione sono stati effettuati diversi test, in ogni fase di sviluppo, al fine di verificare e validare l'implementazione.

Come parametro di verifica si è valutato in primis l'errore tra il profilo di velocità assegnato e la velocità vettura che viene calcolata tramite il modello.

I valori ammissibili di errore sono al massimo quelli derivanti dalle approssimazioni che il software compie nell'effettuare i calcoli, siamo quindi ben al di sotto anche di un solo km/h.

Si è passati poi ad analizzare le principali grandezze di riferimento per una vettura a trazione elettrica, sfruttando il blocco scope descritto nel paragrafo 4.8, verificando che il modello restituisca dei risultati che soddisfino le aspettative.

Sono stati simulati i tre cicli di guida presenti in input (WLTC, UDDS ed Autostradale).

Lo scopo della logica implementata nel modello, oltre a quello di simulare il comportamento della vettura, è di attuare un'ottimizzazione della gestione delle macchine elettriche con il fine di aumentare l'autonomia del veicolo, consentendo inoltre una buona guidabilità della vettura, evitando continui cambi configurazione.

Come detto nel paragrafo 4.3, al fine di minimizzare le perdite si decide di sganciare i motori e portarli a zero RPM quando non è conveniente il loro utilizzo (centralina tramite il confronto energetico decide la configurazione ottimale da attuare).

Non portarli a zero significherebbe avere delle perdite derivanti dalla loro sola rotazione, anche in caso di coppia erogata nulla. Ciò non toglie che in ottica futura, per alcune strategie, si preferisca non portare a zero i motori e mantenerli ad un valore di RPM voluto, perché siano più "pronti" ad erogare coppia se richiesto, ad esempio in condizioni di guida sportiva.

Analizzando i cambi configurazione si è notato che cambiare spesso, anche se conveniente dal punto di vista energetico, risulta però inadeguato in termini di guidabilità.

Si è prestata attenzione quindi, anche all'intervallo temporale tra una configurazione e l'altra (Timer in paragrafo 4.3).

Al fine di completare un ciclo di scarica della batteria, si deve "percorrere" più volte il ciclo inserito in input nella simulazione.

I grafici che verranno analizzati successivamente sono riferiti alla singola percorrenza del ciclo di guida, considerando che il comportamento della vettura, al variare dello stato di carica, può essere ritenuto costante ai fini degli studi effettuati.

I dati analizzati hanno subito un processo di normalizzazione.

Riprendendo quanto già stato detto:

0 indica la configurazione a trazione posteriore, 1 trazione anteriore e tutti i valori compresi la trazione integrale; mentre il segnale relativo alle frizioni indica con 1 che motore e ruota sono agganciati, e con 0 che motore e ruota sono sganciati.

5.1 Simulazione e Analisi Dati - WLTC

Inserendo in input al modello il ciclo di guida WLTC, sono state studiate le quattro configurazioni possibili: Trazione Anteriore, Trazione Posteriore, Trazione Integrale ed Optimal.

Simulando un ciclo di scarica sono stati ottenuti i seguenti risultati:

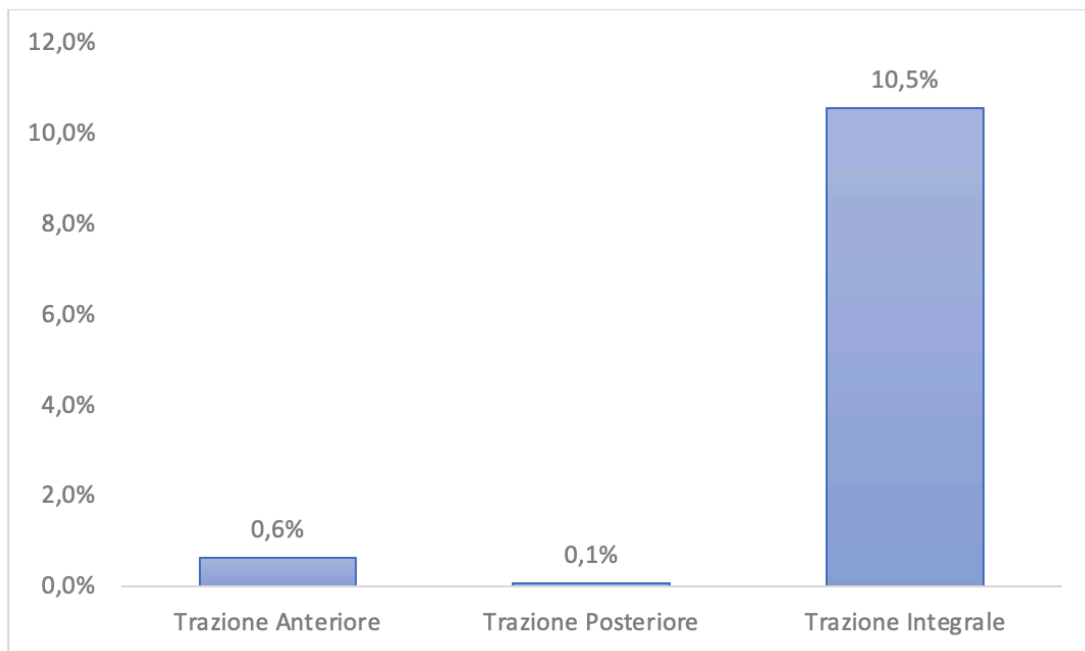


Figura 62 Guadagno Optimal – WLTC

Come mostrato in Figura 62: la configurazione Optimal ha permesso di guadagnare in termini di autonomia il 10,5% sulla configurazione a Trazione Integrale, lo 0,1% sulla Trazione Posteriore e lo 0,6% sulla Trazione Anteriore.

Analizzando il singolo ciclo, in Figura 63 si ha la configurazione ottima calcolata in centralina:

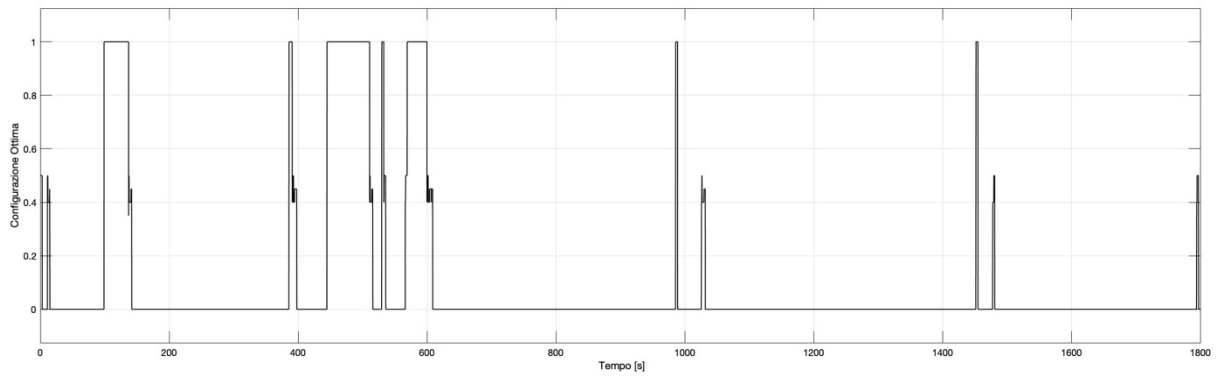


Figura 63 Configurazione Ottima – WLTC

Nelle Figure 64 e 65 si può vedere il segnale di aggancio e sgancio per le frizioni: tale segnale si basa su ciò che viene calcolato in centralina ed elaborato in split coppia.

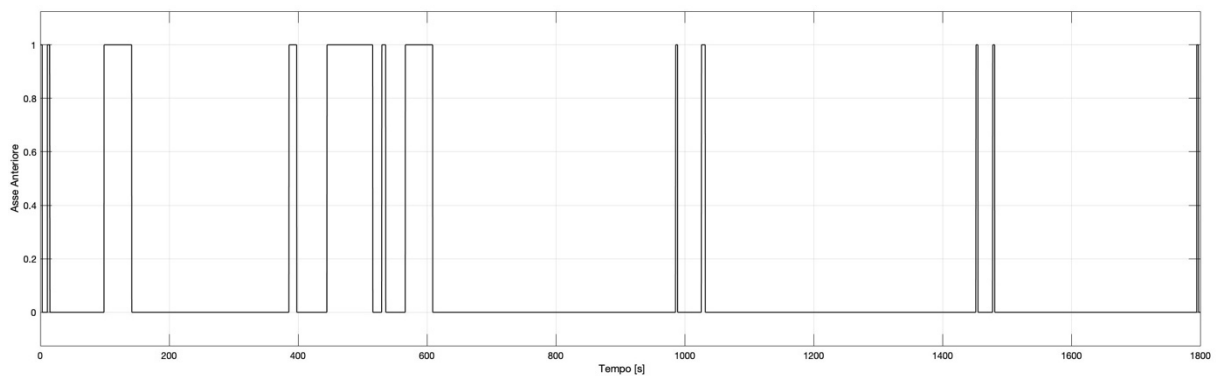


Figura 64 Segnale Frizioni Asse Anteriore – WLTC

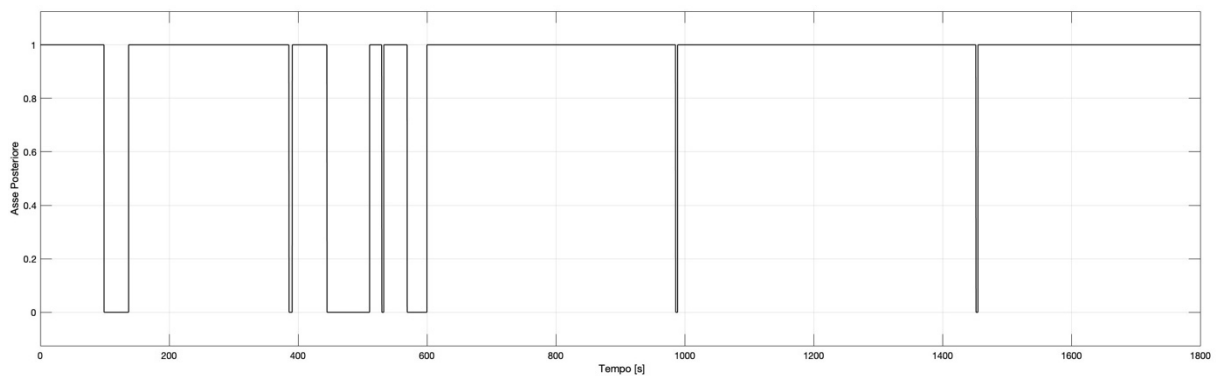


Figura 65 Segnale Frizioni Asse Posteriore - WLTC

In funzione della configurazione, varieranno ovviamente le coppie erogate dai motori ed il numero di giri.

Le Figure 66 e 67 mostrano l'andamento delle coppie per il singolo asse:

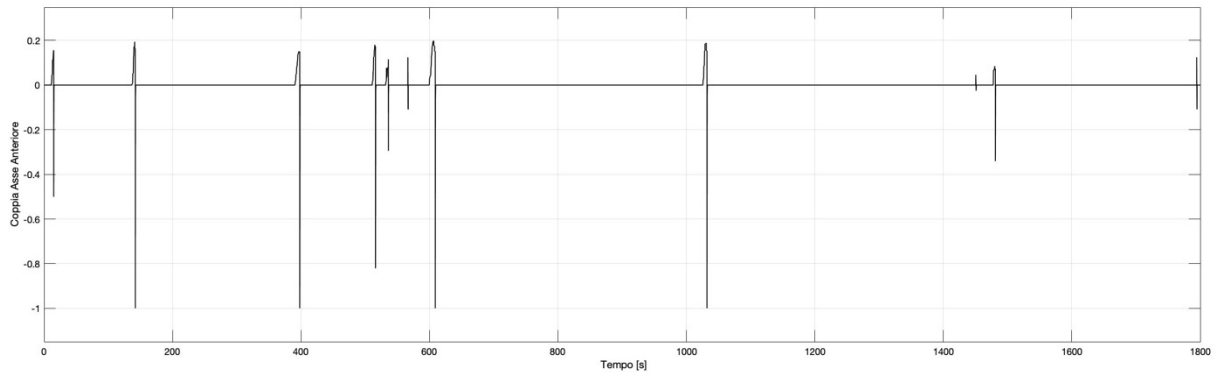


Figura 66 Coppia Asse Anteriore - WLTC

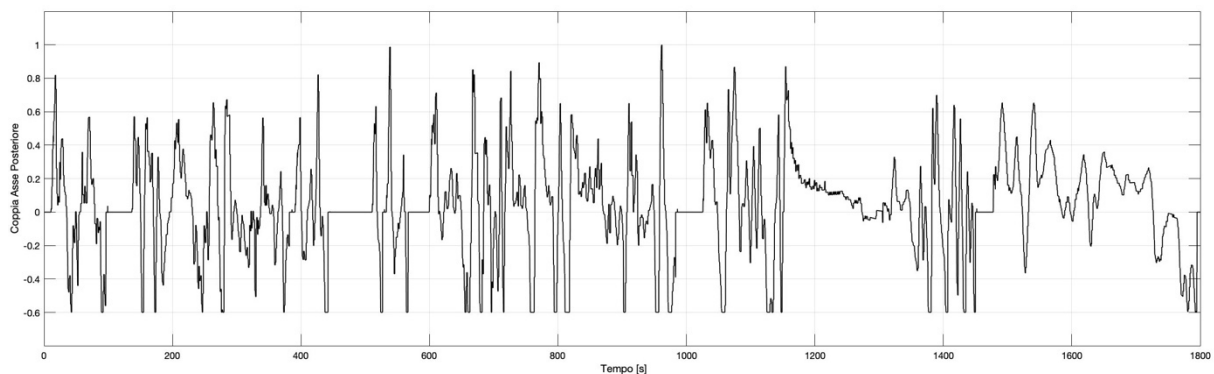


Figura 67 Coppia Asse Posteriore - WLTC

Si può notare come l'asse anteriore eroga coppia per poco tempo e solo in alcuni tratti, rispetto alla coppia erogata dall'asse posteriore.

I picchi negativi di coppia che si rilevano sull'asse anteriore, sono legati alla fase di sgancio del motore, volendolo fermare nel minor tempo possibile.

Analizzando l'andamento degli RPM in Figura 68 e Figura 69, si prende visione, in modo ancora più evidente, della logica attuata.

Sono sovrapposte le tracce di RPM connesso ed RPM effettivo, al fine di evidenziare la variazione di giri in funzione dell'aggancio con la ruota.

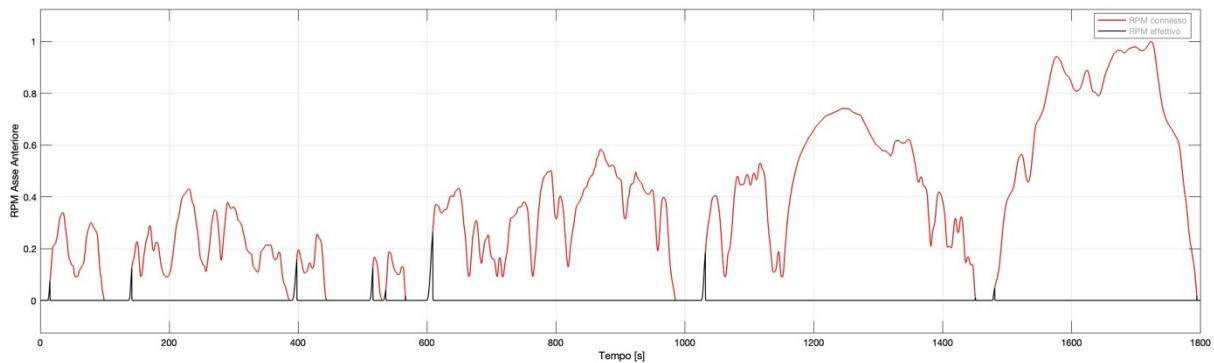


Figura 68 RPM Asse Anteriore - WLTC

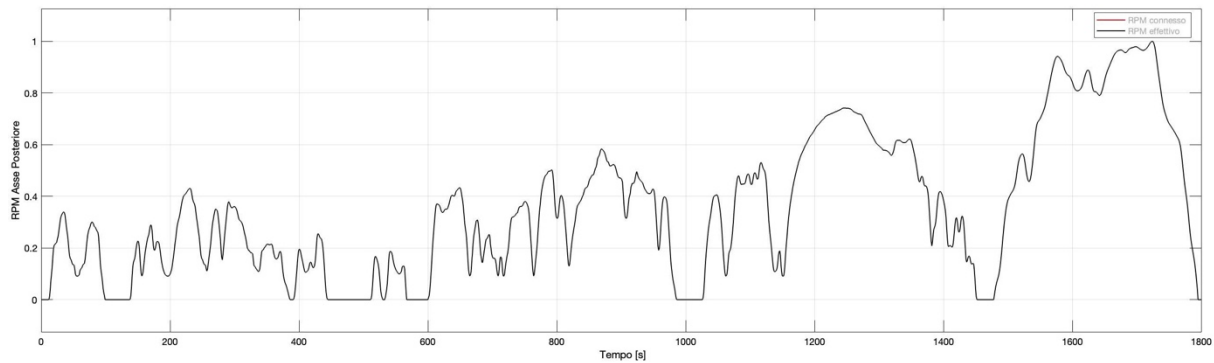


Figura 69 RPM Asse Posteriore - WLTC

Dai precedenti grafici si rileva come i motori, quando non sono scelti per soddisfare le richieste del ciclo, vengono sganciati e portati a zero RPM.

Analizzando nello specifico il ciclo WLTC, si prende atto di come sia più conveniente effettuare la maggior parte del ciclo sfruttando l'asse posteriore, integrando l'asse anteriore solo nelle prime fasi di accelerazione con partenza da fermo (l'andamento "Potenze Configurazioni" per il ciclo WLTC è riportato in Figura 27 nel paragrafo 4.3), rispecchiando le aspettative, in quanto tale scelta è dettata dal punto di lavoro al quale si trovano i motori nelle fasi di ripartenza da fermo del veicolo.

E' risaputo che una macchina elettrica a basse velocità di rotazione, ha un'efficienza peggiore all'aumentare della coppia.

Utilizzando quindi anche l'asse anteriore per le ripartenze, la coppia erogata dal singolo motore diminuisce, portando il punto di lavoro in una zona a maggior efficienza.

Successivamente la configurazione a Trazione Posteriore risulterà comunque la più efficiente, e l'asse anteriore verrà sganciato, in accordo con quanto detto nel paragrafo 4.3.

A conferma del comportamento appena descritto, vengono riportate le mappe di efficienza dei motori posteriori, effettuando un confronto della prima fase di accelerazione:

In Figura 70 e 71 si hanno le mappe di efficienza dei motori, con i relativi punti di lavoro, quando viene utilizzata la configurazione Optimal e la configurazione a Trazione Posteriore.

Le colorazioni variano in funzione dei valori di efficienza: in blu scuro si hanno i valori di efficienza più bassi fino ad arrivare al rosso scuro per valori di efficienza più alti.

Sono riportate anche le curve limite di coppia massima in modalità motore e generatore.

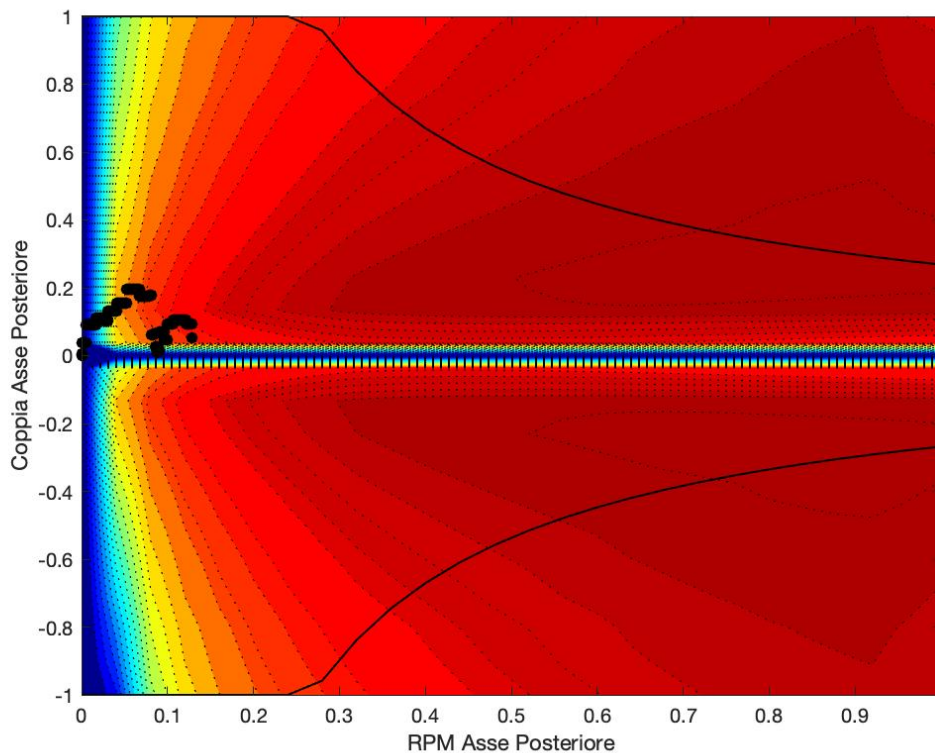


Figura 70 Mappa Posteriore Optimal – WLTC

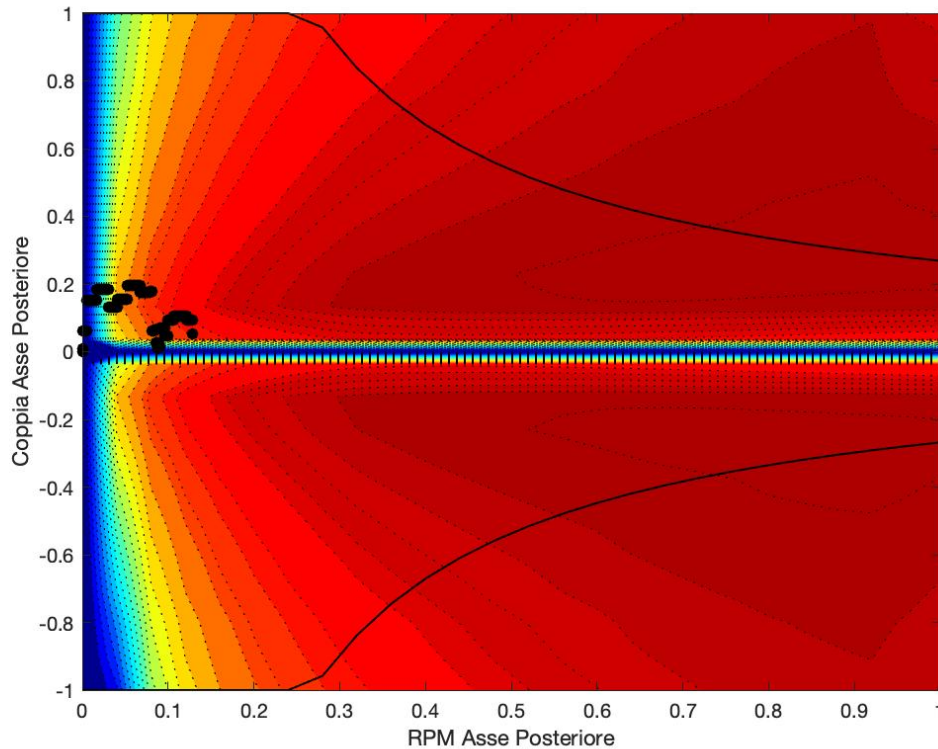


Figura 71 Mappa Posteriore Trazione Posteriore – WLTC

Dall'analisi delle mappe appena illustrate, si riescono ad apprezzare ancor meglio le scelte che l'algoritmo di gestione delle macchine elettriche esegue, al fine di ottimizzare la gestione dell'energia.

In Figura 71 si possono notare i punti di lavoro nel caso in cui l'intera fase di accelerazione viene gestita dai soli motori posteriori, notando a parità di RPM delle coppie più elevate da erogare, con conseguente peggioramento dell'efficienza.

Per migliorare tale situazione, centralina decide di attivare anche i motori anteriori per una prima fase, in modo da abbassare la coppia richiesta al singolo asse, portandolo a lavorare in condizioni di efficienza migliori (lo si nota nella fase a bassi RPM di Figura 70).

Una volta raggiunte velocità di rotazione dei motori più elevate, la configurazione Optimal sgancia l'asse anteriore in quanto l'asse posteriore riesce a soddisfare le richieste del ciclo, lavorando in punti di efficienza che risultano essere i migliori, confrontati con tutte le altre configurazioni possibili.

I benefici delle logiche implementate li possiamo notare anche analizzando ciò che avviene all'interno della batteria.

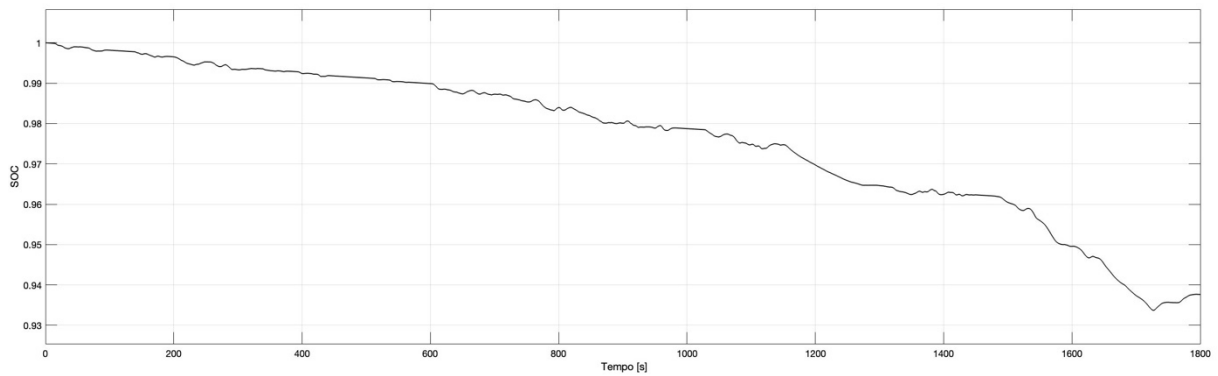


Figura 72 SOC – WLTC

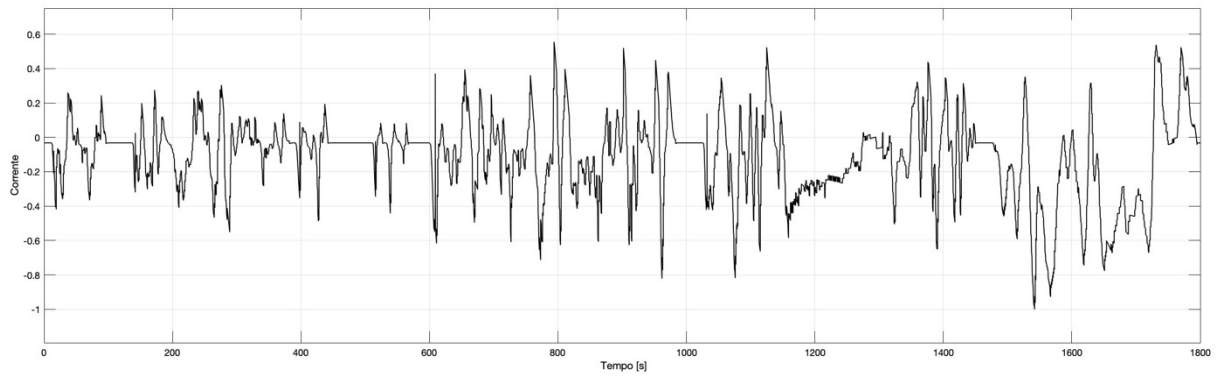


Figura 73 Corrente – WLTC

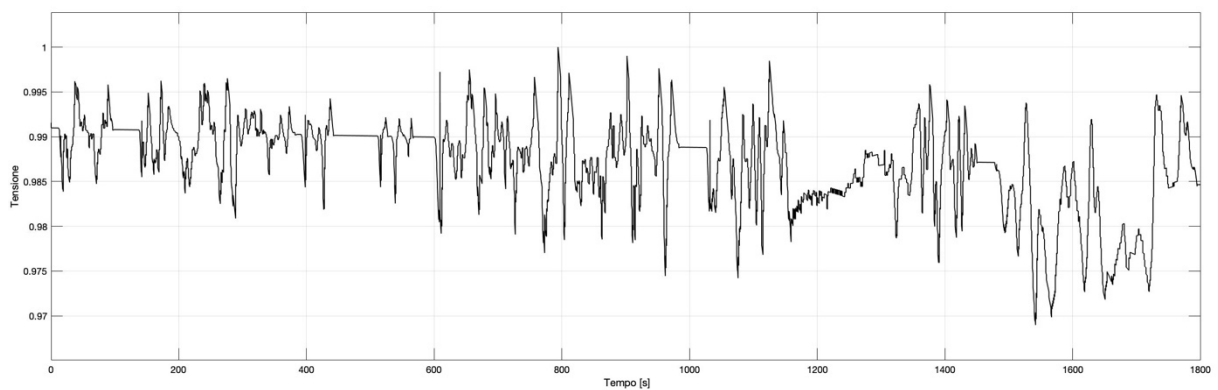


Figura 74 Tensione - WLTC

Si può notare come la corrente in batteria, negativa in fase di erogazione di coppia tende ad abbassare il SOC, mentre nelle altre fasi, la corrente positiva tende a caricare la batteria. Corrente negativa legata sia alla fase di sgancio dei motori, che all'utilizzo dei motori per decelerazioni modeste, come visto nel paragrafo 4.2.

E' stata inoltre valutata l'importanza del timer, in termini di autonomia e guidabilità, in quanto impedisce sotto un certo arco temporale di effettuare dei cambi di configurazione.

Le configurazioni Timer2 e Timer3 sono configurazioni con valori di cambiata crescenti. Entrambe hanno tempi maggiori della configurazione già studiata che chiameremo Timer1, che sarà alla base dei dati analizzati.

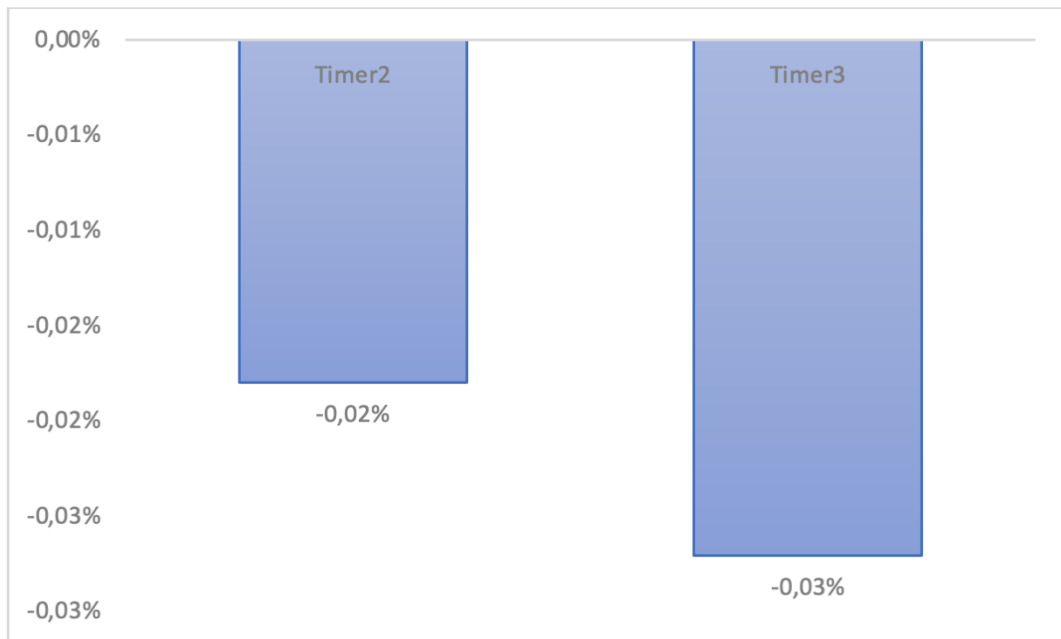


Figura 75 Guadagno Cambio Timer – WLTC

Come si può notare dalla Figura 75, l'aumentare del valore di T_timer non porta benefici dal punto di vista dell'autonomia, anzi il range di chilometri seppur di poco peggiora.

La configurazione ottima subisce lievissime variazioni.

5.2 Simulazione e Analisi Dati - UDDS

Inserendo in input al modello il ciclo di guida UDDS, sono state studiate le quattro configurazioni possibili: Trazione Anteriore, Trazione Posteriore, Trazione Integrale e Optimal.

Simulando un ciclo di scarica, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

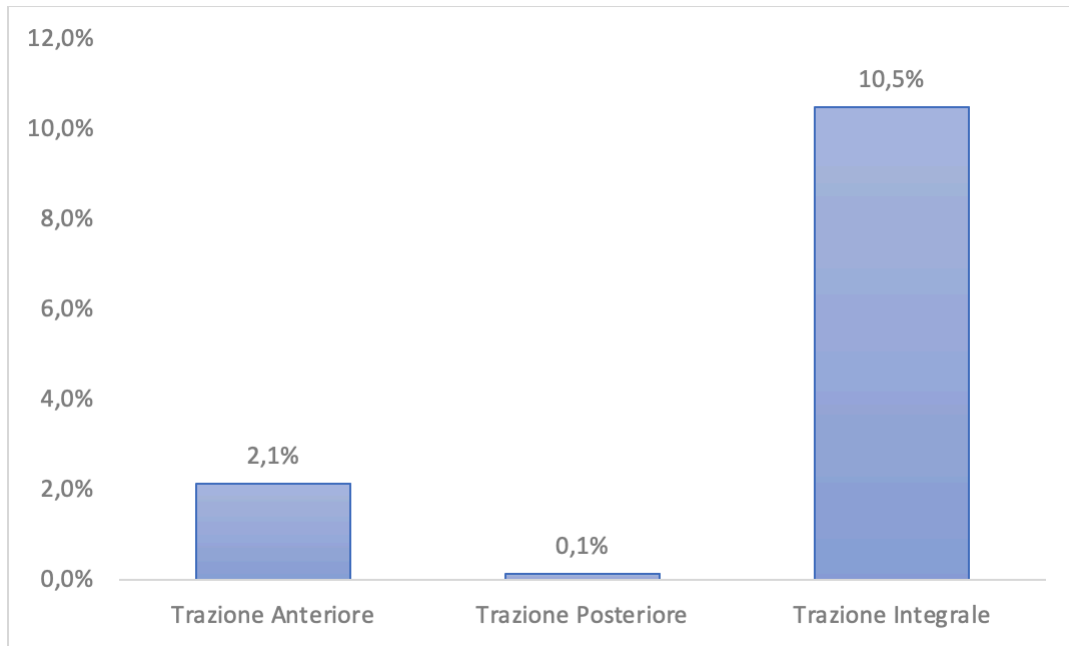


Figura 76 Guadagno Optimal – UDDS

Come mostrato in Figura 76: la configurazione Optimal ha permesso di guadagnare, in termini di autonomia il 10,5% sulla configurazione a Trazione Integrale, lo 0,1% sulla Trazione Posteriore ed il 2,1% sulla Trazione Anteriore.

Analizzando il singolo ciclo, in Figura 77 si ha la configurazione ottima calcolata in centralina:

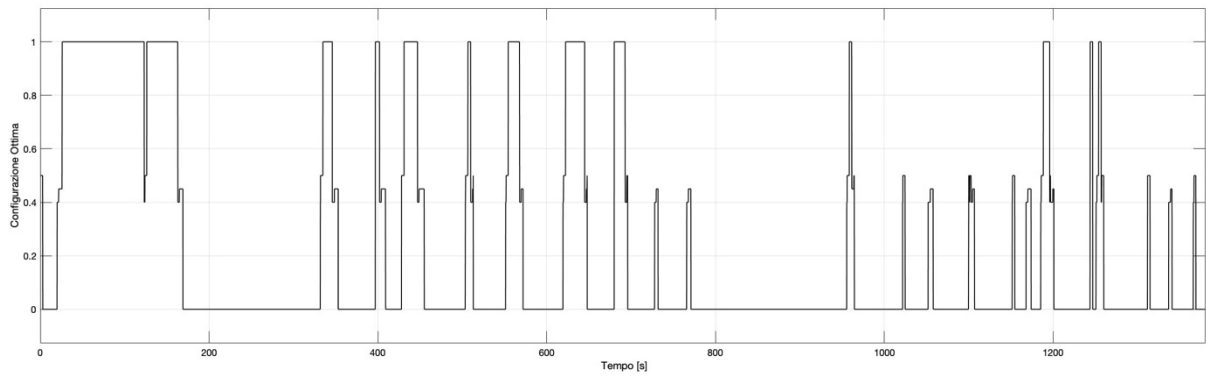


Figura 77 Configurazione Ottima – UDDS

Nelle Figure 78 e 79 si può vedere il segnale di aggancio e sgancio per le frizioni: tale segnale si basa su ciò che viene calcolato in centralina ed elaborato in split coppia.

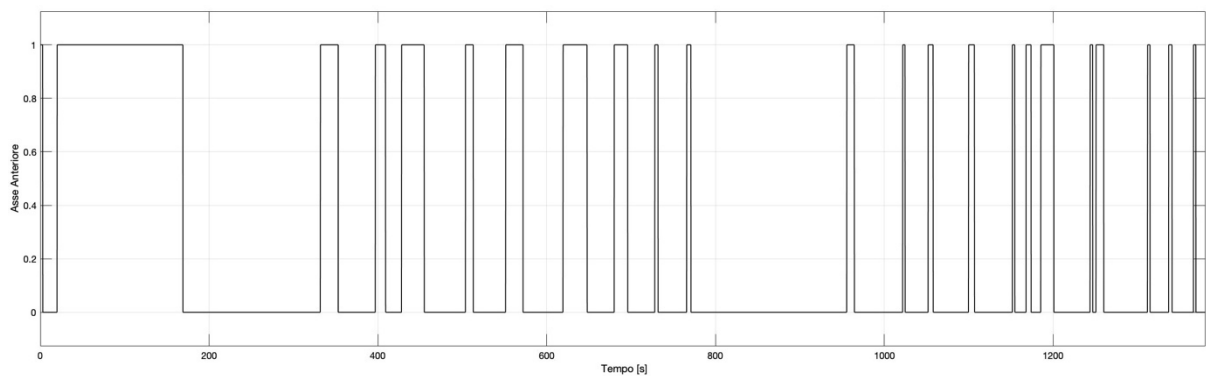


Figura 78 Segnale Frizioni Asse Anteriore – UDDS

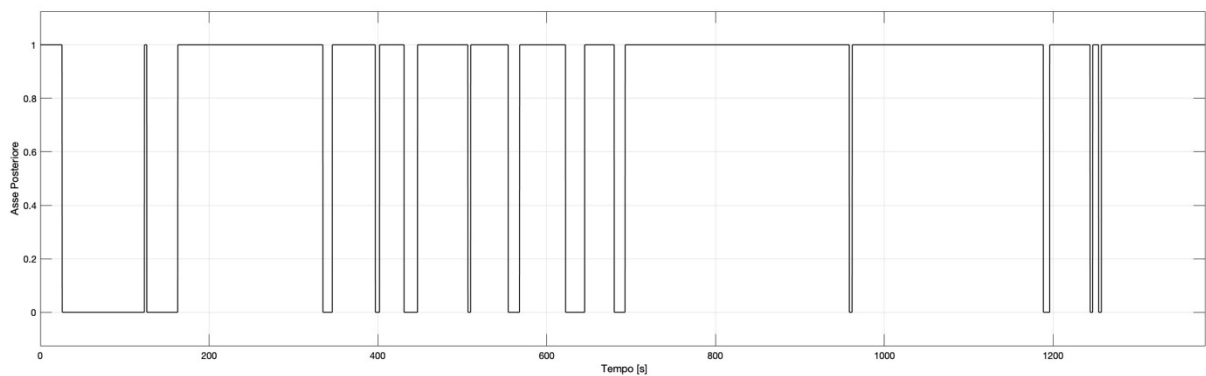


Figura 79 Segnale Frizioni Asse Posteriore - UDDS

In funzione della configurazione, varieranno ovviamente le coppie erogate dai motori ed il numero di giri.

Le Figure 80 e 81 mostrano l'andamento delle coppie per il singolo asse:

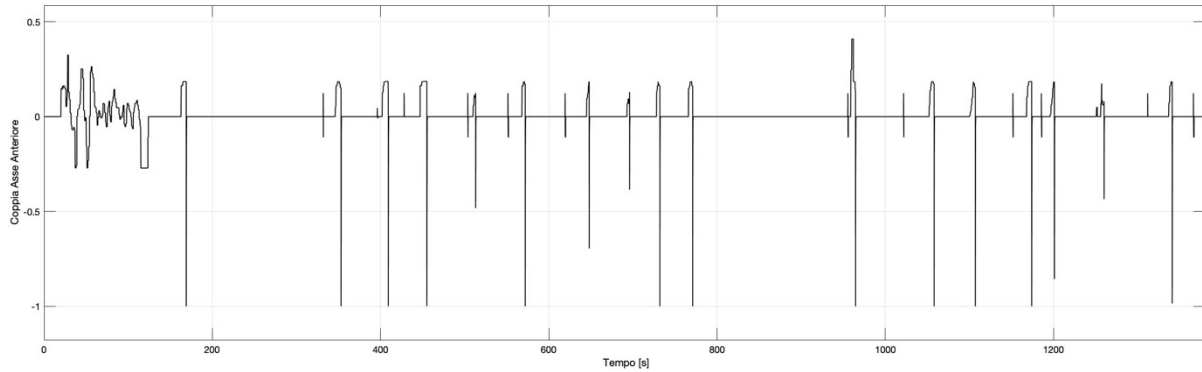


Figura 80 Coppia Asse Anteriore – UDDS

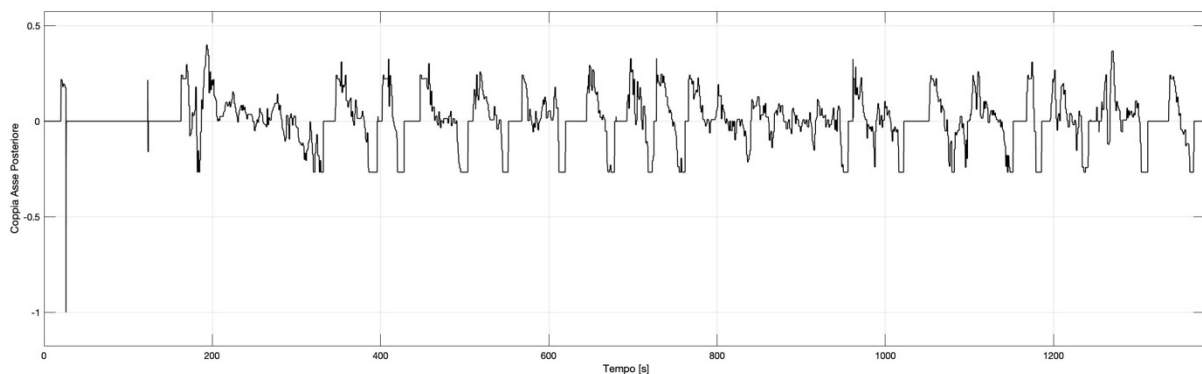


Figura 81 Coppia Asse Posteriore – UDDS

Si può notare come l'asse anteriore eroga coppia per poco tempo e solo in alcuni tratti, rispetto alla coppia erogata dall'asse posteriore.

I picchi negativi di coppia che si rilevano sull'asse anteriore, sono legati alla fase di sgancio del motore, volendolo fermare nel minor tempo possibile.

Questa tipologia di ciclo, avendo più ripartenze da fermo rispetto al WLTC, implica un maggior utilizzo dell'asse anteriore.

Analizzando l'andamento degli RPM in Figura 82 e Figura 83, si prende visione, in modo ancora più evidente, della logica attuata.

Sono sovrapposte le tracce di RPM connesso ed RPM effettivo, al fine di evidenziare la variazione di giri in funzione dell'aggancio con la ruota.

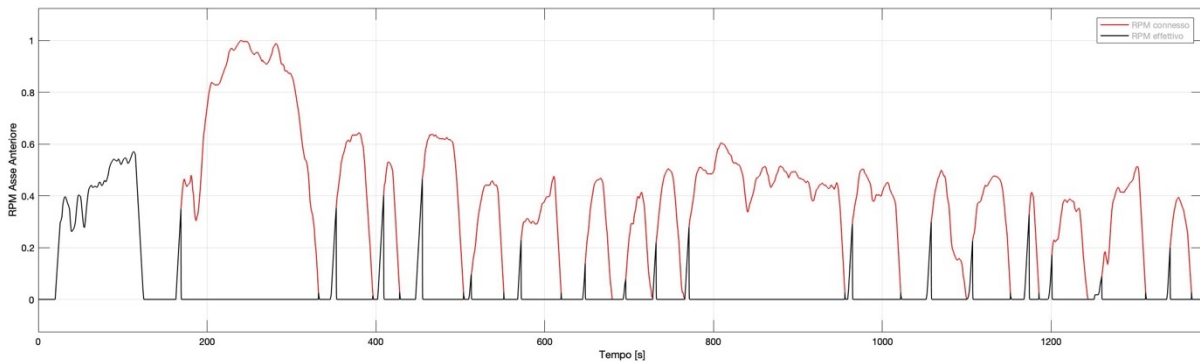


Figura 82 RPM Asse Anteriore – UDDS

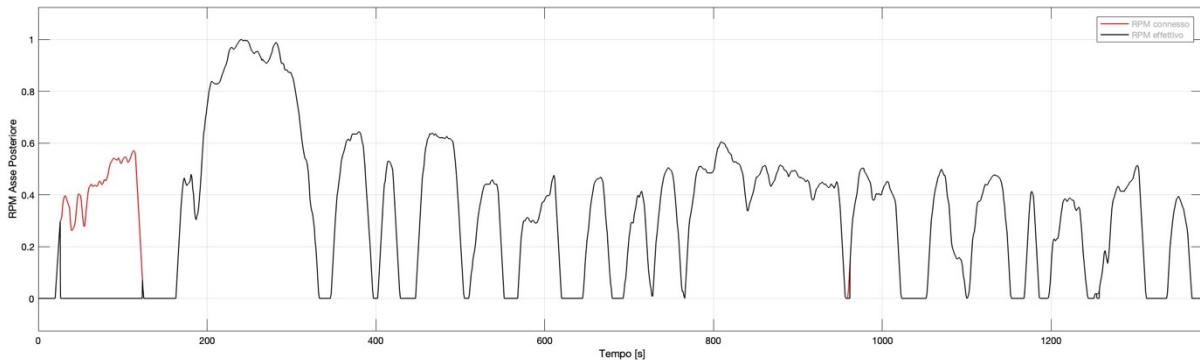


Figura 83 RPM Asse Posteriore – UDDS

Dai precedenti grafici si rileva come i motori, quando non sono scelti per soddisfare le richieste del ciclo, vengono sganciati e portati a zero RPM.

Analizzando nello specifico il ciclo UDDS, si prende atto, anche in questo caso, di come sia più conveniente effettuare l'intero ciclo con l'asse posteriore, ed utilizzare anche l'anteriore solo per le ripartenze.

Tale scelta è dettata dal punto di lavoro al quale si trovano i motori nelle fasi di ripartenza da fermo del veicolo, in quanto è risaputo che una macchina elettrica a basse velocità di rotazione, ha un'efficienza peggiore all'aumentare della coppia.

Utilizzando quindi, anche l'asse anteriore per le ripartenze, la coppia erogata dal singolo motore diminuisce, portando il punto di lavoro in una zona a miglior efficienza.

Successivamente la configurazione a Trazione Posteriore risulterà comunque la più efficiente, e l'asse anteriore verrà sganciato.

L'unica eccezione al comportamento appena descritto la si può notare nei primi secondi del ciclo, dove dopo la configurazione a Trazione Integrale centralina sceglie la Trazione Anteriore invece della Posteriore.

Come mostrato in Figura 84, tale scelta avviene in quanto, per un breve lasso temporale (dal secondo 26 al secondo 28), la Trazione Anteriore risulta essere la scelta migliore, ma visti i vincoli energetici imposti, l'energia spesa per il cambio impedisce di lasciare tale configurazione (dopo il secondo 28), anche se risulta essere quella non ottimale, in accordo con quanto detto nel paragrafo 4.3.

Una volta che l'energia spesa per il cambio assume un valore tale da non penalizzare il cambio verso la configurazione ottima (successiva fase di ripartenza), avremo che la logica attuata segue le aspettative, sganciando l'asse anteriore dopo le fasi di ripartenza.

La scelta della configurazione, delle volte, può essere condizionata dal particolare andamento del profilo di velocità e accelerazione del ciclo guida utilizzato.

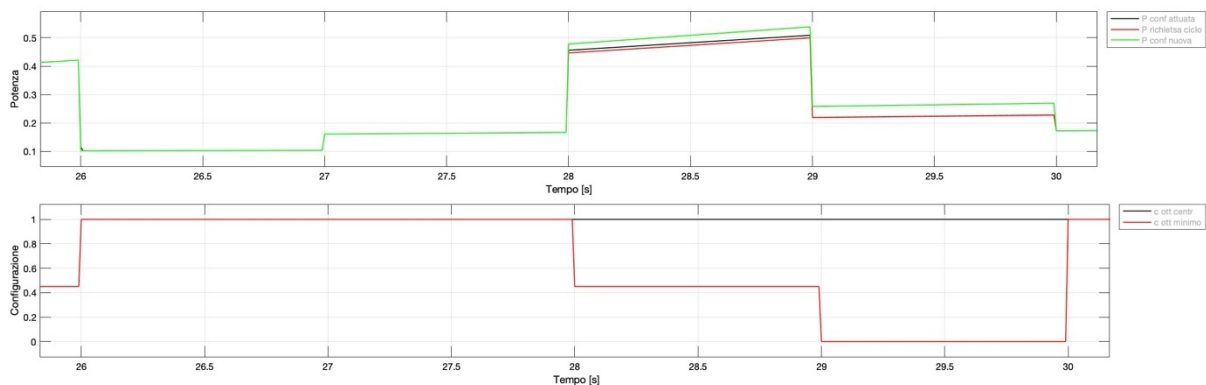


Figura 84 Dettaglio Andamento Potenze e Configurazioni tratto iniziale - UDDS

A conferma del comportamento appena descritto, vengono riportate le mappe di efficienza dei motori anteriori, effettuando un confronto della prima fase di accelerazione, dove è l'asse posteriore ad essere sganciato:

In Figura 85 e 86 si hanno le mappe di efficienza dei motori, con i relativi punti di lavoro, quando viene utilizzata la configurazione Optimal e la configurazione a Trazione Anteriore.

Le colorazioni variano in funzione dei valori di efficienza: in blu scuro si hanno i valori di efficienza più bassi fino ad arrivare al rosso scuro per valori di efficienza più alti.

Sono riportate anche le curve limite di coppia massima in modalità motore e generatore.

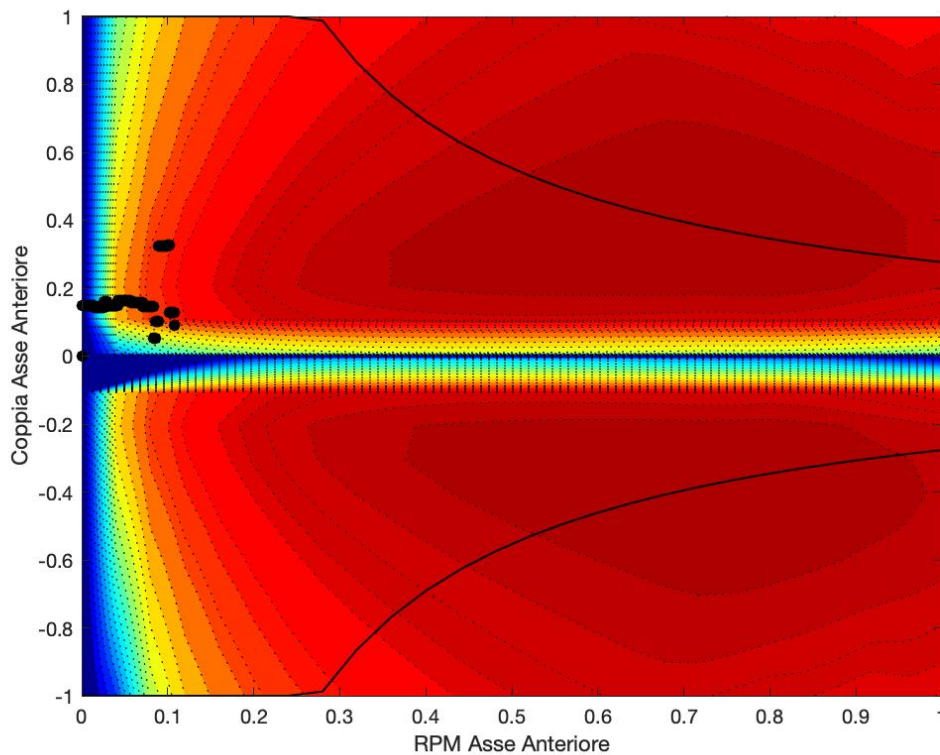


Figura 85 Mappa Anteriore Optimal - UDDS

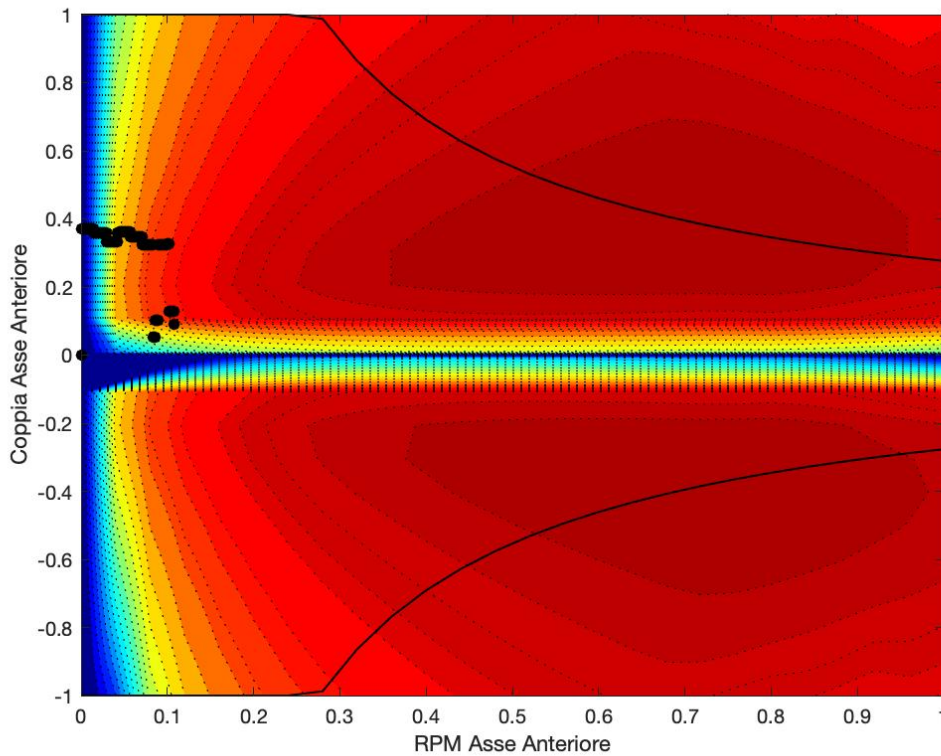


Figura 86 Mappa Anteriore Trazione Anteriore – UDDS

Dall'analisi delle mappe appena illustrate, si riescono ad apprezzare ancor meglio le scelte che l'algoritmo di gestione delle macchine elettriche esegue, al fine di ottimizzare la gestione dell'energia.

In Figura 86 si possono notare i punti di lavoro nel caso in cui l'intera fase di accelerazione viene gestita dai soli motori anteriori, notando a parità di RPM delle coppie più elevate da erogare, con conseguente peggioramento dell'efficienza.

Per migliorare tale situazione, centralina decide di attivare anche i motori posteriori per una prima fase, in modo da abbassare la coppia richiesta al singolo asse, portandolo a lavorare in condizioni di efficienza migliori (lo si nota nella fase a bassi RPM di Figura 85).

Una volta raggiunte velocità di rotazione dei motori più elevate, la configurazione Optimal sgancia l'asse posteriore in quanto l'asse anteriore riesce a soddisfare le richieste del ciclo, lavorando in punti di efficienza che risultano essere i migliori (come detto precedentemente per un tempo breve), confrontati con tutte le altre configurazioni possibili.

I benefici delle logiche implementate li possiamo notare anche analizzando ciò che avviene all'interno della batteria.

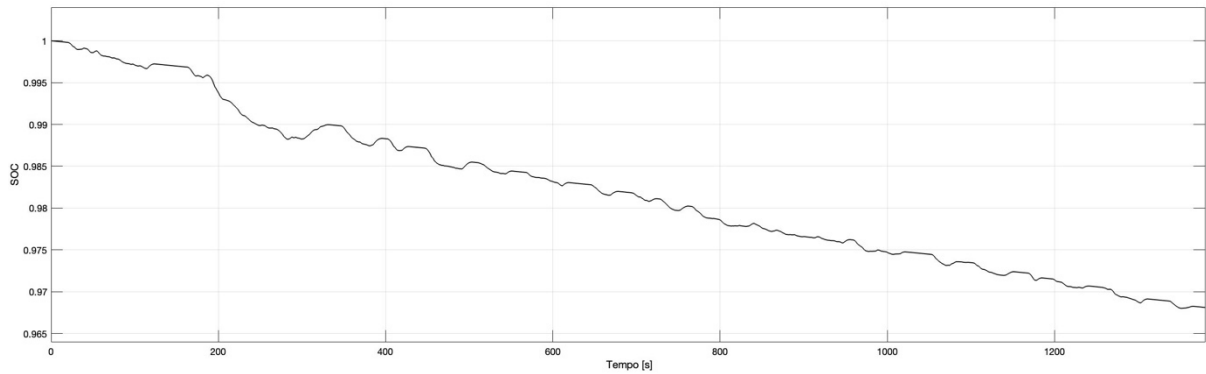


Figura 87 SOC – UDDS

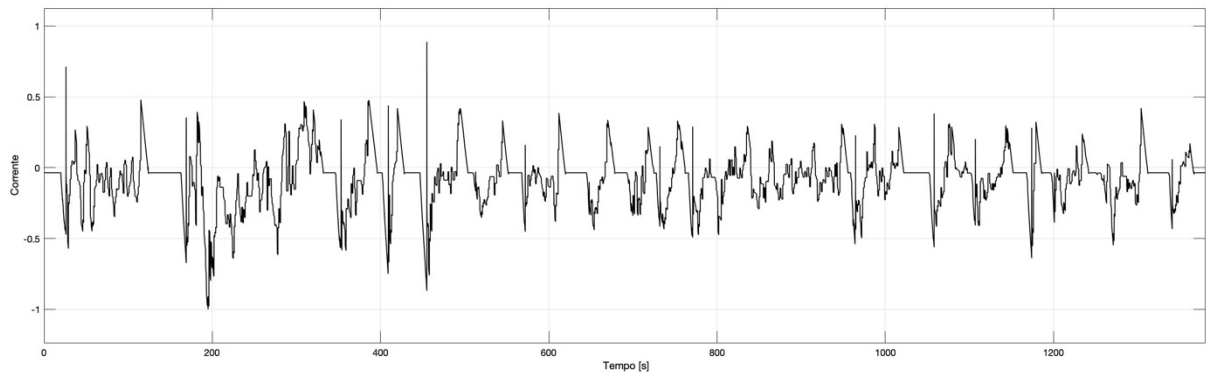


Figura 88 Corrente – UDDS

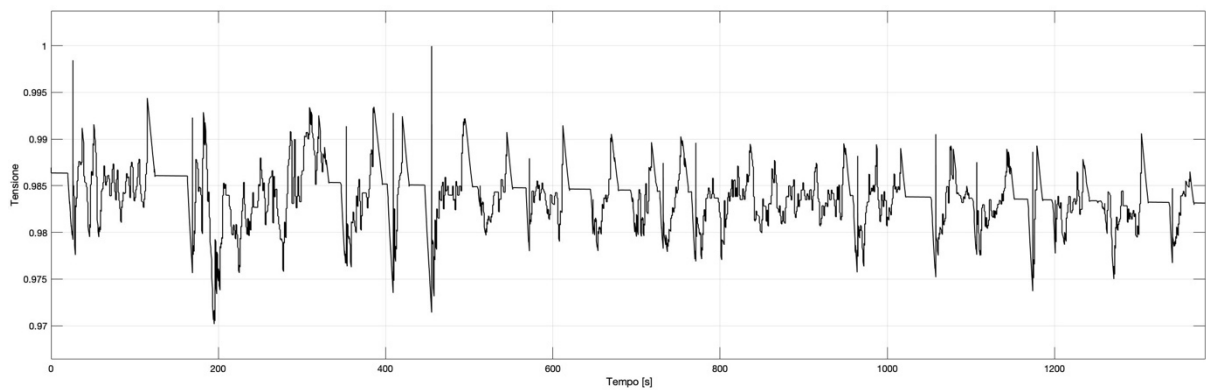


Figura 89 Tensione – UDDS

Si può notare come la corrente in batteria, negativa in fase di erogazione di coppia tende ad abbassare il SOC, mentre nelle altre fasi, la corrente positiva tende a caricare la batteria. Corrente negativa legata sia alla fase di sgancio dei motori, che all'utilizzo dei motori per decelerazioni modeste, come visto nel paragrafo 4.2.

E' stata inoltre valutata l'importanza del timer, in termini di autonomia e guidabilità, in quanto impedisce sotto un certo arco temporale di effettuare dei cambi di configurazione.

Le configurazioni Timer2 e Timer3 sono configurazioni con valori di cambiata crescenti. Entrambe hanno tempi maggiori della configurazione già studiata che chiameremo Timer1, che sarà alla base dei dati analizzati.

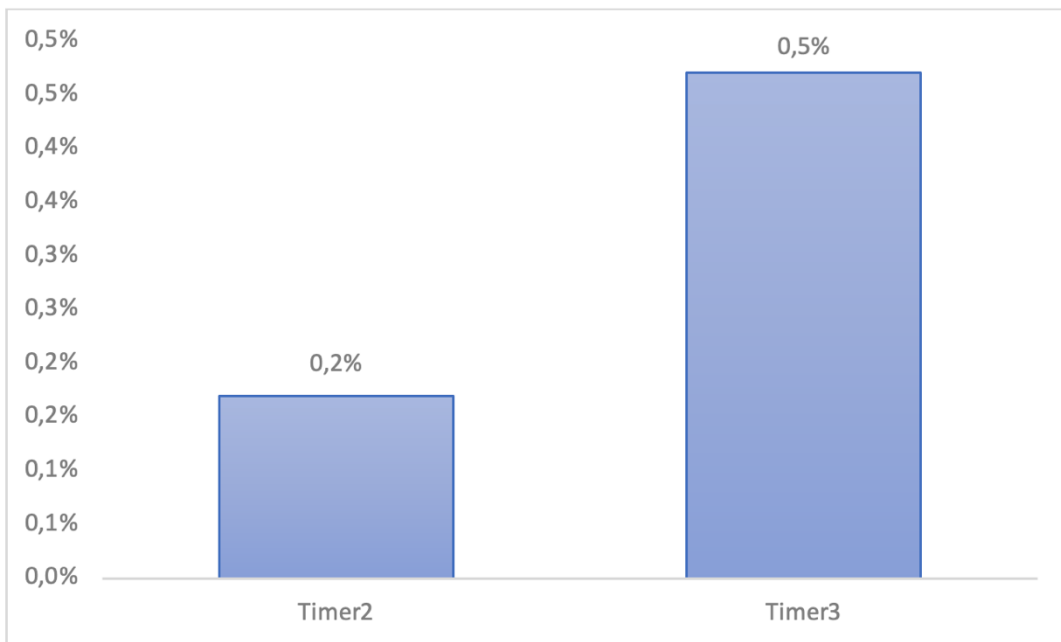


Figura 90 Guadagno Cambio Timer – UDDS

Come si può notare dalla Figura 90, l'aumentare del valore di T_timer porta benefici dal punto di vista dell'autonomia, seppur minimi.

La configurazione ottima subisce lievissime variazioni.

5.3 Simulazione e Analisi Dati - Autostradale

Inserendo in input al modello il ciclo di guida Autostradale, sono state studiate le quattro configurazioni possibili: Trazione Anteriore, Trazione Posteriore, Trazione Integrale e Optimal.

Simulando un ciclo di scarica, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

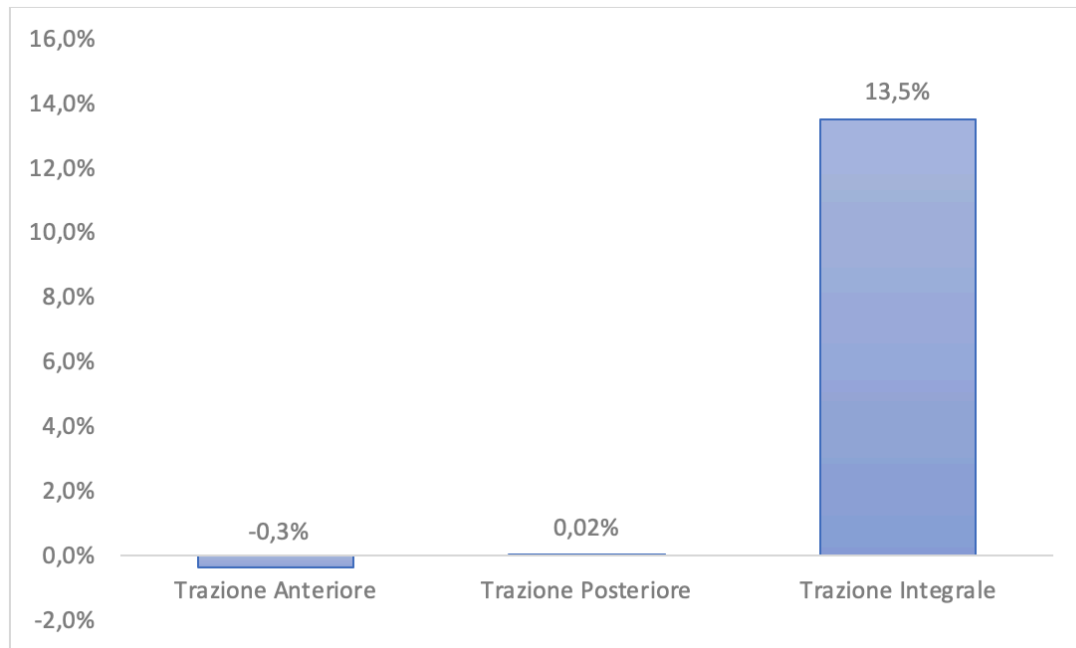


Figura 91 Guadagno Optimal – Autostradale

Come mostrato in Figura 91: la configurazione Optimal ha permesso di guadagnare, in termini di autonomia il 13,5% sulla configurazione a Trazione Integrale, lo 0,02% sulla Trazione Posteriore, ma a differenza degli altri due cicli di omologazione, invece di trarre dei benefici, rispetto alla Trazione Anteriore perde lo 0,3%.

Analizzando il singolo ciclo, in Figura 92 si ha la configurazione ottima calcolata in centralina:

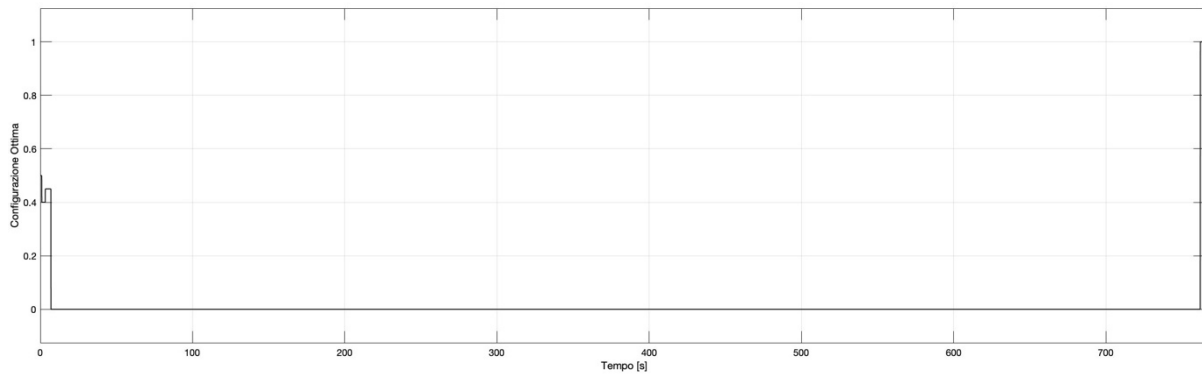


Figura 92 Configurazione Ottima – Autostradale

Nelle Figure 93 e 94 si può vedere il segnale di aggancio e sgancio per le frizioni: tale segnale si basa su ciò che viene calcolato in centralina ed elaborato in split coppia.

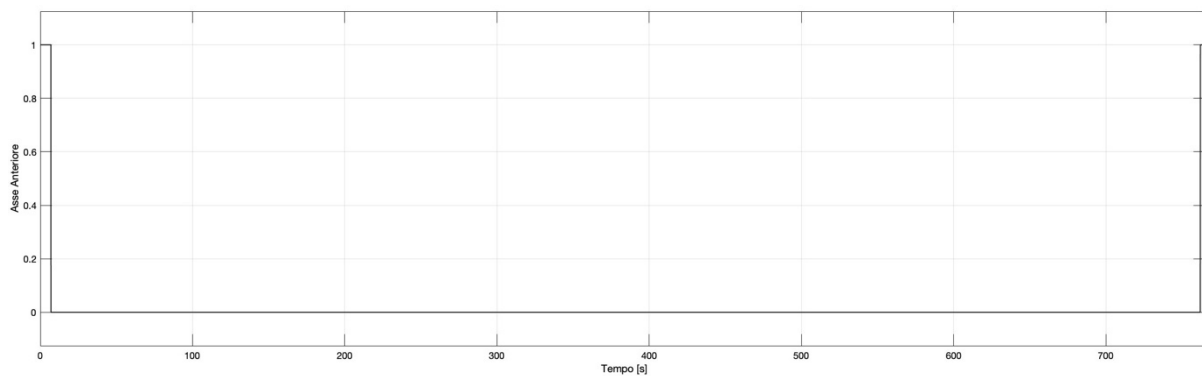


Figura 93 Segnale Frizioni Asse Anteriore – Autostradale

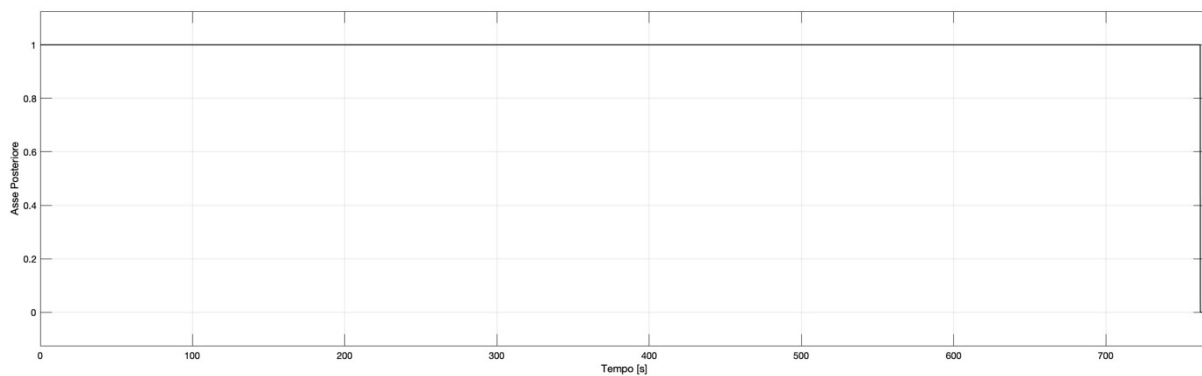


Figura 94 Segnale Frizioni Asse Posteriore - Autostradale

In funzione della configurazione, varieranno ovviamente le coppie erogate dai motori ed il numero di giri.

Le Figure 95 e 96 mostrano l'andamento delle coppie per il singolo asse:

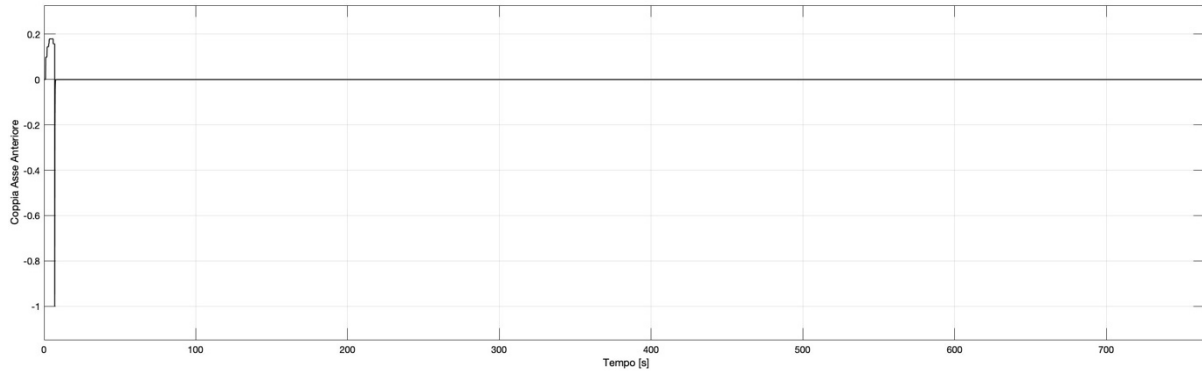


Figura 95 Coppia Asse Anteriore – Autostradale

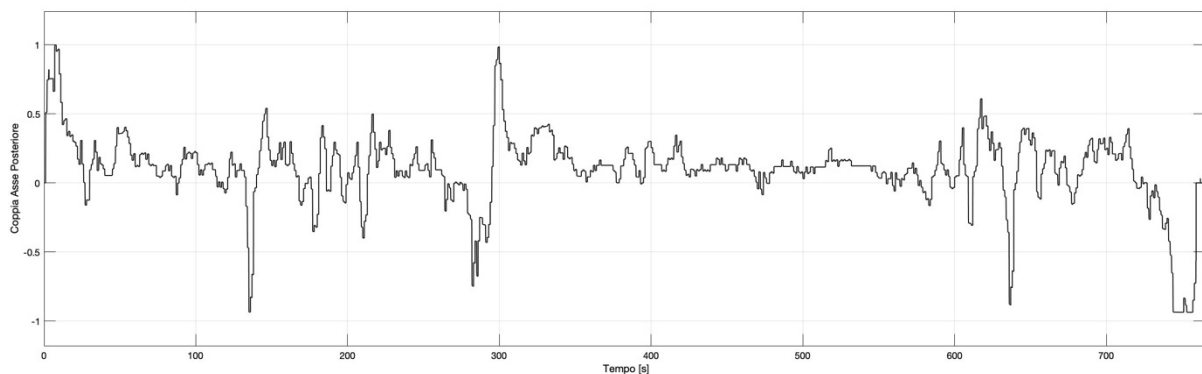


Figura 96 Coppia Asse Posteriore – Autostradale

Si può notare come per la quasi totalità del ciclo viene utilizzato solo l'asse posteriore.

Il picco negativo di coppia che si rileva sull'asse anteriore, è legato alla fase di sgancio del motore, volendolo fermare nel minor tempo possibile.

Analizzando l'andamento degli RPM in Figura 97 e Figura 98, si prende visione, in modo ancora più evidente, della logica attuata

Sono sovrapposte le tracce di RPM connesso ed RPM effettivo, al fine di evidenziare la variazione di giri in funzione dell'aggancio con la ruota.

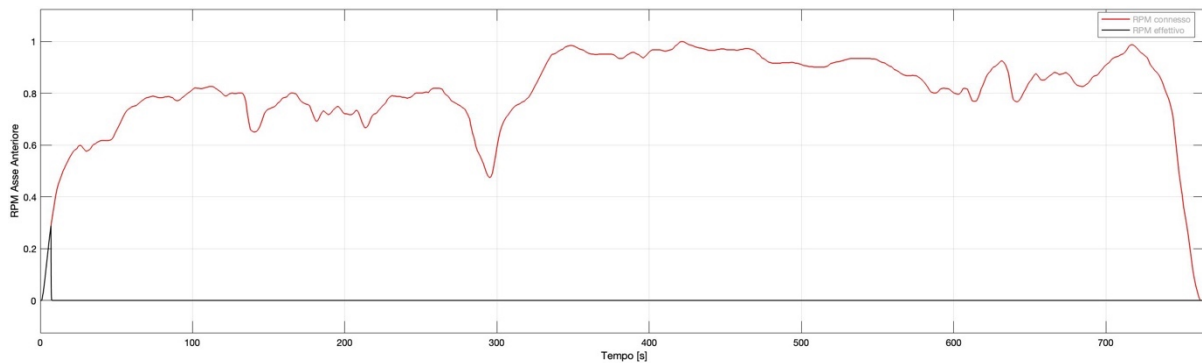


Figura 97 RPM Asse Anteriore – Autostradale

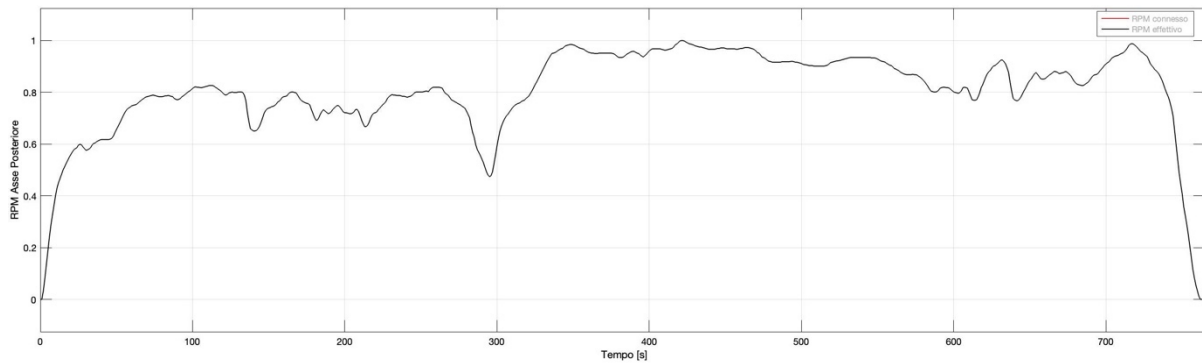


Figura 98 RPM Asse Posteriore – Autostradale

Dai precedenti grafici si rileva come i motori, quando non sono scelti per soddisfare le richieste del ciclo, vengono sganciati e portati a zero RPM.

Analizzando nello specifico il ciclo Autostradale, si prende atto, di come a differenza di tutti gli altri cicli studiati, la configurazione Optimal non è la più conveniente, in quanto, seppur di poco, la configurazione a Trazione Anteriore risulta essere la migliore.

Nella prima fase del ciclo, si nota come la trazione scelta è quella Integrale, per poi passare alla sola Trazione Posteriore.

Tale scelta è dettata dal punto di lavoro al quale si trovano i motori nelle fasi di ripartenza da fermo del veicolo, in quanto è risaputo che una macchina elettrica a basse velocità di rotazione, ha un'efficienza peggiore all'aumentare della coppia.

Utilizzando quindi, anche l'asse anteriore per le ripartenze, la coppia erogata dal singolo motore diminuisce, portando il punto di lavoro in una zona a miglior efficienza.

A conferma del comportamento appena descritto, vengono riportate le mappe di efficienza dei motori posteriori, effettuando un confronto della prima fase di accelerazione:

In Figura 99 e 100 si hanno le mappe di efficienza dei motori posteriori, con i relativi punti di lavoro, quando viene utilizzata la configurazione Optimal e la configurazione a Trazione Posteriore.

Le colorazioni variano in funzione dei valori di efficienza: in blu scuro si hanno i valori di efficienza più bassi fino ad arrivare al rosso scuro per valori di efficienza più alti.

Sono riportate anche le curve limite di coppia massima in modalità motore e generatore.

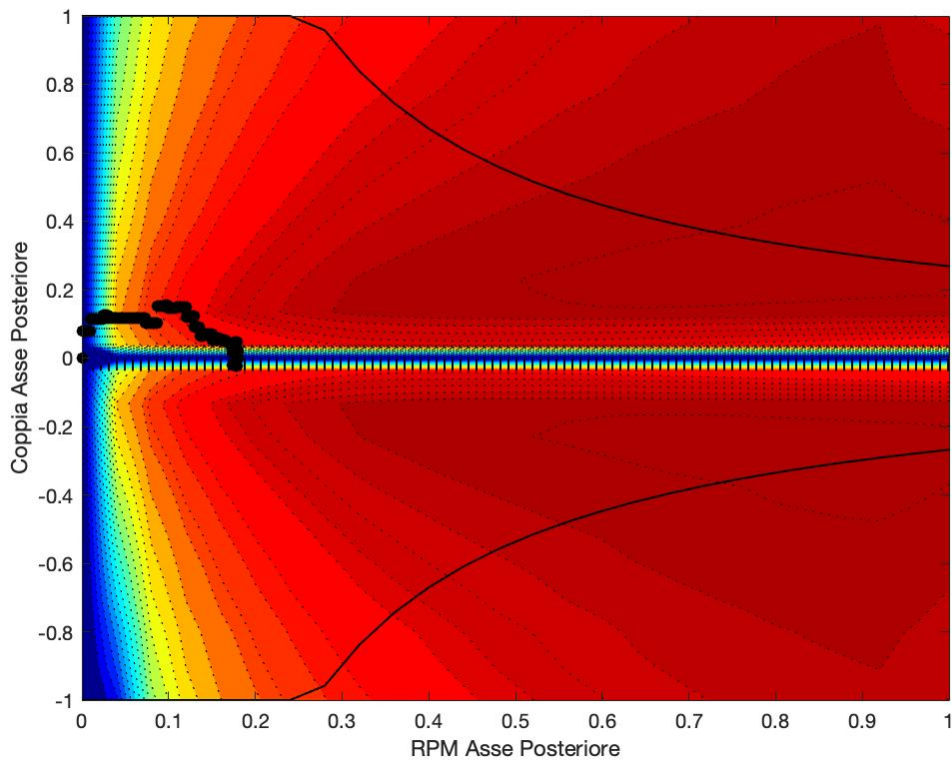


Figura 99 Mappa Posteriore Optimal - Autostradale

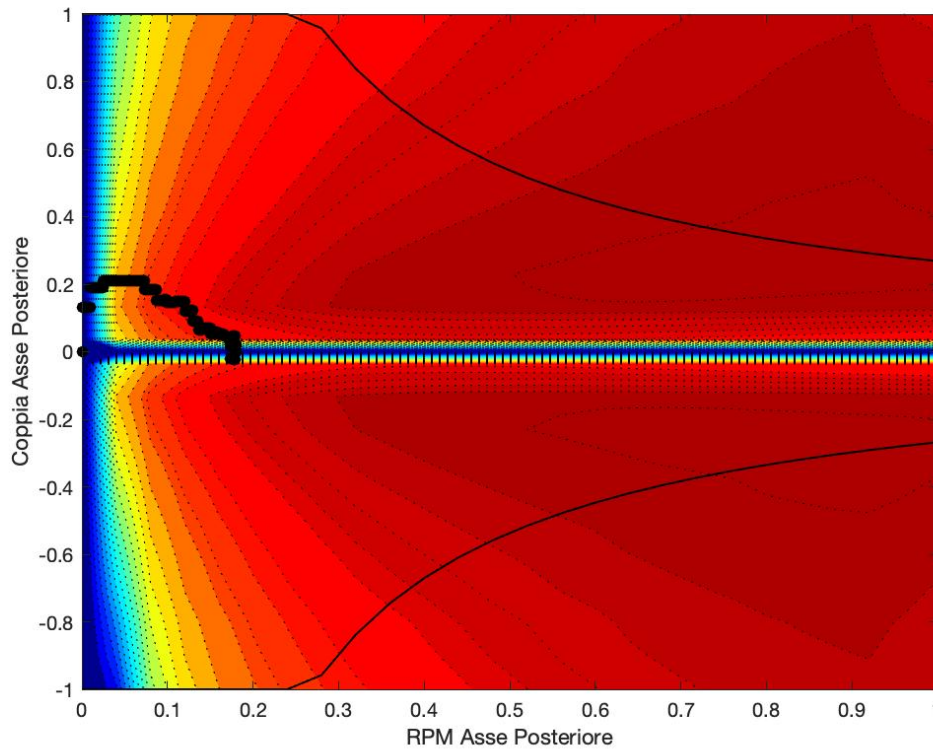


Figura 100 Mappa Posteriore Trazione Posteriore – Autostradale

Dall'analisi delle mappe appena illustrate, si riescono ad apprezzare ancor meglio le scelte che l'algoritmo di gestione delle macchine elettriche esegue, al fine di ottimizzare la gestione dell'energia.

In Figura 100 si possono notare i punti di lavoro nel caso in cui l'intera fase di accelerazione viene gestita dai soli motori posteriori, notando a parità di RPM delle coppie più elevate da erogare, con conseguente peggioramento dell'efficienza.

Per migliorare tale situazione, centralina decide di attivare anche i motori anteriori per una prima fase, in modo da abbassare la coppia richiesta al singolo asse, portandolo a lavorare in condizioni di efficienza migliori (lo si nota nella fase a bassi RPM di Figura 99).

Una volta raggiunte velocità di rotazione dei motori più elevate, la configurazione Optimal sgancia l'asse anteriore per svolgere il ciclo con l'asse posteriore, anche se la configurazione più efficiente (seppur di poco) risulta essere la Trazione Anteriore.

Dall'analisi delle potenze richieste si riesce a dare una spiegazione a tale risultato:

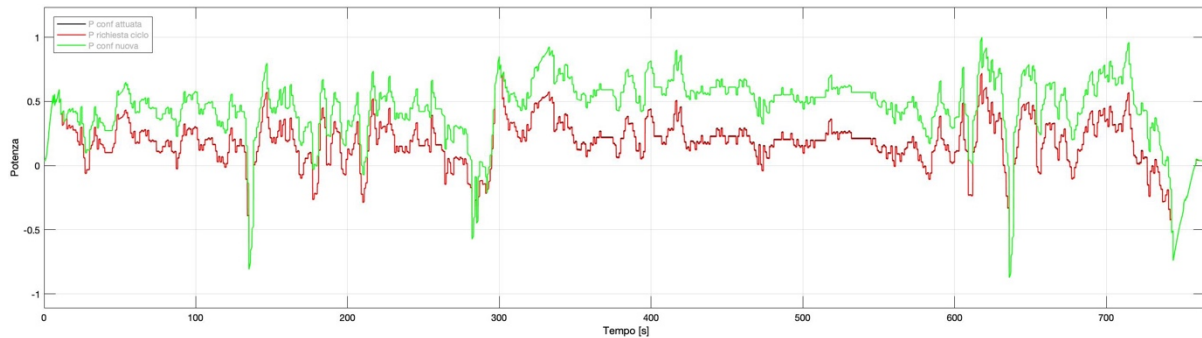


Figura 101 Potenze Configurazioni – Autostradale

In Figura 101 viene riportato in verde l'andamento del segnale di potenza sfruttando una nuova configurazione (comprensivo di potenza spesa per il cambio), in rosso l'andamento del segnale di potenza richiesta dal solo ciclo di guida con la nuova configurazione (trascurando la potenza spesa per andare in tale configurazione) ed in nero l'andamento del segnale di potenza richiesta dal solo ciclo di guida mantenendo la configurazione attuale.

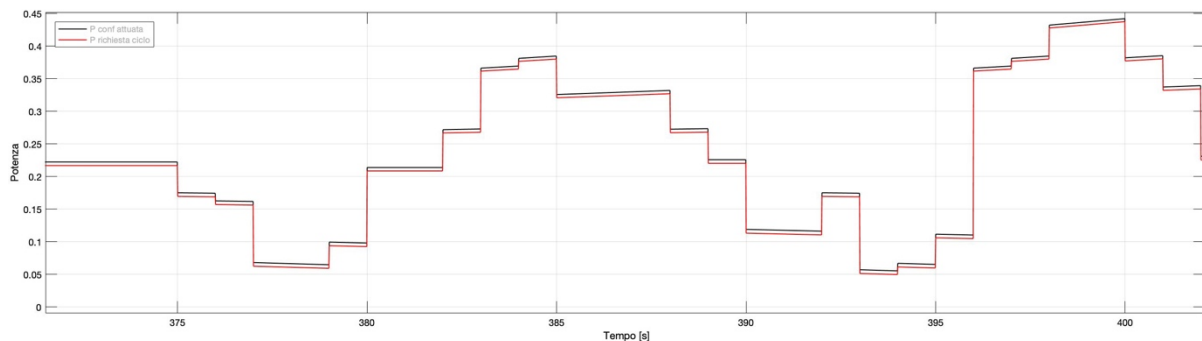


Figura 102 Dettaglio Potenze – Autostradale

Il motivo per il quale sfruttando Optimal non si riesce ad avere il massimo dell'autonomia lo si può vedere in Figura 102, dove viene riportato l'andamento delle potenze per un tratto del ciclo (andamento rappresentativo dell'intero ciclo).

Si può notare come la configurazione attuale, seppur di poco, richiede una potenza maggiore rispetto a quella richiesta con la nuova configurazione.

L'ago della bilancia è la potenza associata al cambio configurazione, che fa aumentare notevolmente la potenza della nuova configurazione (segnale verde in Figura 101) rendendola sconveniente dal punto di vista energetico, impedendone quindi l'attuazione.

Per tale motivo, dopo una prima fase iniziale del ciclo dove si utilizza la configurazione a Trazione Integrale, si passa alla Trazione Posteriore, la migliore per il tratto dal secondo 7 al secondo 12, per poi restarci per l'intero ciclo, in quanto effettuare un nuovo cambio non è conveniente per via della potenza spesa per l'aggancio dell'asse anteriore.

La scelta della configurazione, delle volte, può essere condizionata dal particolare andamento del profilo di velocità e accelerazione del ciclo guida utilizzato.

Non avendo più ripartenze da fermo all'interno dello stesso ciclo, l'energia legata al cambio avrà sempre valori rilevanti nel confronto che centralina effettua, impedendo di fatto il cambio verso la configurazione migliore.

In Figura 103 si può notare in dettaglio gli andamenti di Potenze e Configurazioni nei primi secondi del ciclo:

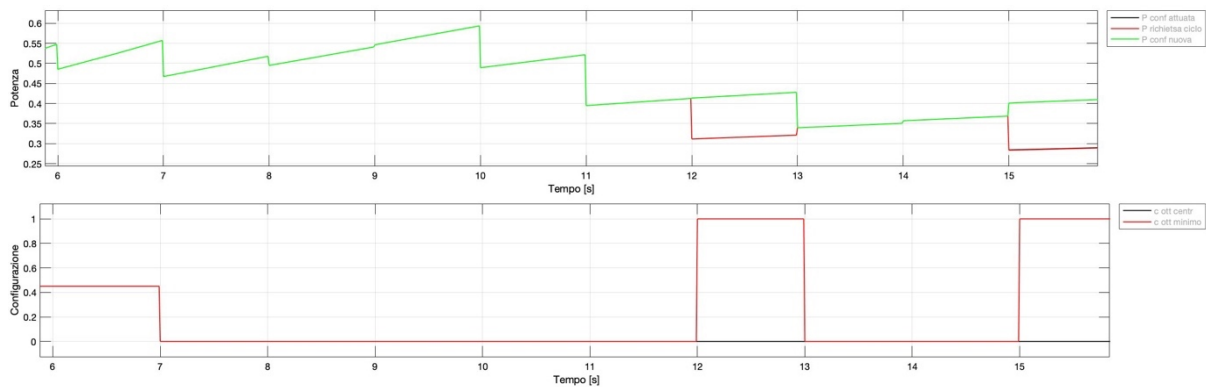


Figura 103 Dettaglio Andamento Potenze e Configurazioni tratto iniziale - Autostradale

Effettuando quindi la maggior parte del ciclo con una configurazione molto vicina all'ottima, anche se non lo è, ci fa perdere nel risultato finale lo 0.3% di autonomia rispetto alla configurazione a Trazione Anteriore, che risulta essere la migliore.

Anche se la configurazione con maggiore autonomia per il veicolo, non è la Optimal, essa fornisce comunque dei benefici sullo stato di carica come nelle altre simulazioni:

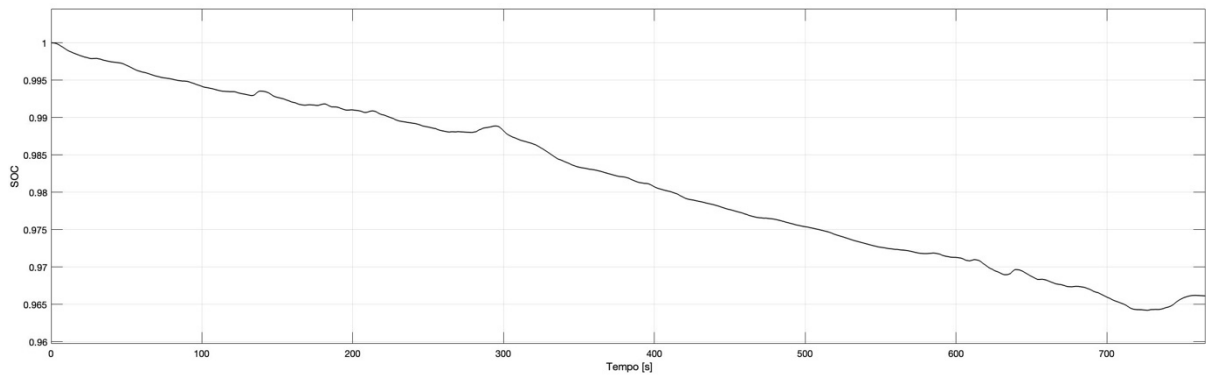


Figura 104 SOC – Autostradale

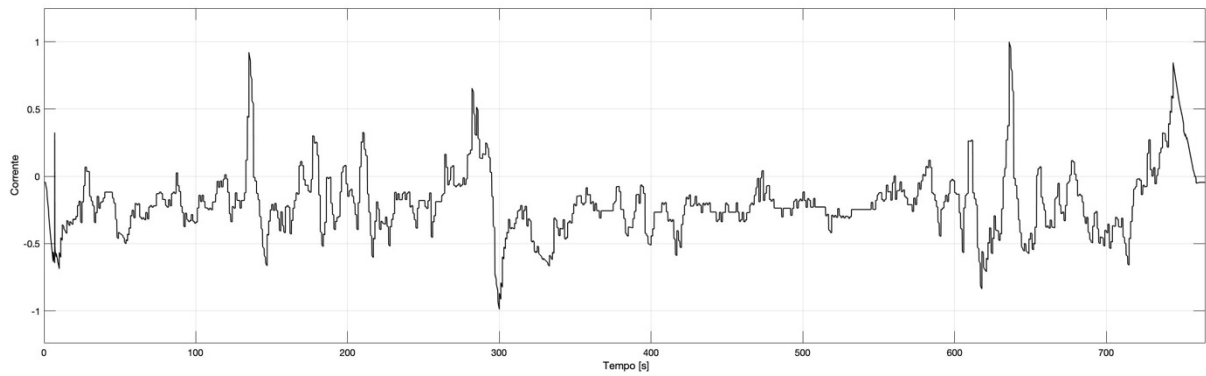


Figura 105 Corrente – Autostradale

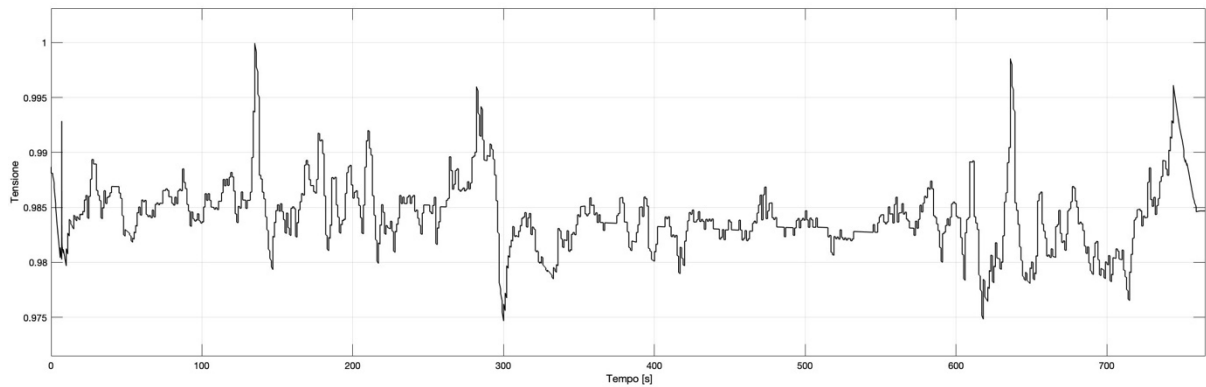


Figura 106 Tensione – Autostradale

Si può notare anche nel caso in cui non siamo nella configurazione ottimale, come la corrente in batteria, negativa in fase di erogazione di coppia tende ad abbassare il SOC, mentre nelle altre fasi, la corrente positiva tende a caricare la batteria.

Corrente negativa legata sia alla fase di sgancio dei motori, che all'utilizzo dei motori per decelerazioni modeste, come visto nel paragrafo 4.2.

E' stata inoltre valutata l'importanza del timer, in termini di autonomia e guidabilità, in quanto impedisce sotto un certo arco temporale di effettuare dei cambi di configurazione.

Le configurazioni Timer2 e Timer3 sono configurazioni con valori di cambiata crescenti. Entrambe hanno tempi maggiori della configurazione già studiata che chiameremo Timer1, che sarà alla base dei dati analizzati.

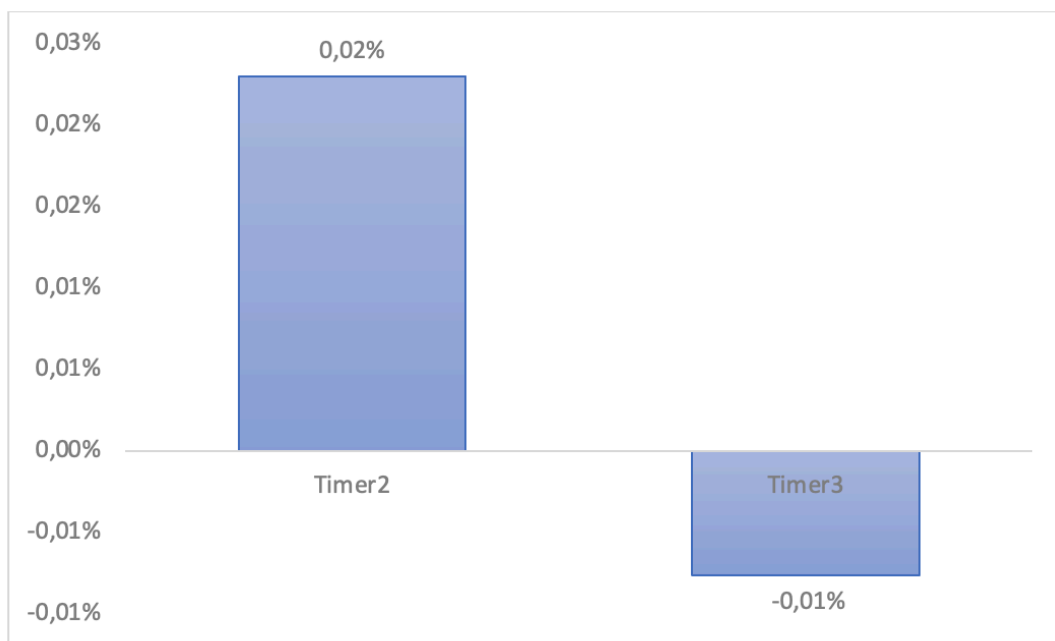


Figura 107 Guadagno Cambio Timer - Autostradale

Come si può notare dalla Figura 107, l'aumentare del valore di T_timer, nel caso di Timer2 porta dei benefici, mentre Timer3 no, non dimenticando che si tratta di valori trascurabili. La variazione di T_timer potrebbe essere considerata irrilevante.

La configurazione ottima subisce lievissime variazioni.

CONCLUSIONI

Lo scopo di questa tesi è stato quello di sviluppare un ambiente di simulazione per l'analisi energetica di una Supercar BEV.

Come da obiettivi prefissati è stato modellato l'intero ambiente di simulazione, ed è stata implementata una logica di gestione delle macchine elettriche.

Oltre a valutare la risposta della vettura in funzione dei cicli di guida imposti, i dati analizzati ci permettono di affermare che le perdite legate alla sola rotazione di una macchina elettrica, anche in caso di coppia nulla, generano delle perdite non trascurabili; suggerendoci di fermare le macchine elettriche quando non è richiesto il loro utilizzo, al fine di minimizzare le perdite. Tutto ciò risulta valido allo stato attuale della modellazione, in quanto, cambiando gli obiettivi potrebbe cambiare anche la decisione di fermare i motori quando sganciati.

Successivamente, è stata ricercata la configurazione ottima da utilizzare per ampliare il range di chilometri percorsi, ed inoltre, è stata studiata anche la frequenza con cui far avvenire i cambi di configurazione, al fine di preservare l'affidabilità del sistema ed il piacere di guida.

Tutto ciò si traduce in un miglioramento delle prestazioni del veicolo in termini di autonomia.

Dall'analisi dei dati ottenuti dalle simulazioni effettuate, si può affermare che la logica implementata in centralina permette una migliore gestione delle macchine elettriche, spostando il loro punto di lavoro verso zone ad efficienze migliori a seconda delle richieste, grazie ai cambi di configurazione.

Inglobando in tale logica un timer, si è migliorata notevolmente la situazione legata alla connessione/disconnessione dei motori, con conseguenti ripercussioni sulle sensazioni di guida, influenzando comunque in maniera trascurabile l'autonomia del veicolo.

Probabilmente per poter apprezzare maggiormente le variazioni legate al timer, bisognerebbe utilizzare dei valori più distanti tra di loro, di quelli utilizzati in quest'analisi.

Tale ambiente di simulazione e tale logica potrà essere ulteriormente sviluppata, con l'obiettivo finale di poter avere un'implementazione fattibile in una centralina vera e propria in vettura, tenendo conto della potenza di calcolo a disposizione (ben diversa da un pc), con tutto ciò che ne consegue.

Al termine di questo progetto posso affermare di aver ampliato le mie conoscenze sulle vetture a trazione elettrica e sull'utilizzo dei software MATLAB & Simulink, oltre ad aver compreso ancor di più l'importanza delle simulazioni nel processo di sviluppo di un veicolo; in quanto, implementare e calibrare correttamente una logica di gestione dell'energia all'interno della vettura, può portare a notevoli vantaggi sotto ogni punto di vista, dalla pura prestazione al piacere di guida.

BIBLIOGRAFIA & SITOGRAFIA

- [1] Thomas J. Böhme, Benjamin Frank, *Hybrid System, Optimal Control and Hybrid Vehicles, Theory, Methods and Applications*, Springer, 2017.
- [2] Simona Onori, Lorenzo Serrao, Giorgio Rizzoni, *Hybrid Electric Vehicles, Energy Management Strategies*, Springer, 2016.
- [3] Lino Guzzella, Antonio Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization*, Springer, 2013.
- [4] Paolo Bolzern, Riccardo Scattolini, Nicola Schiavoni, *Fondamenti di Controlli Automatici*, McGraw-Hill, 2004.
- [5] Nicolò Cavina, Materiale del corso “*Propulsori Termici e Ibridi per Autoveicoli M C.I.*”.
- [6] Ferrari
<https://www.ferrari.com/it-IT>

RINGRAZIAMENTI

E' stato un onore ed un piacere aver avuto la possibilità di collaborare ad un progetto di tesi con Ferrari, eccellenza mondiale nel settore automotive.

Ringrazio per tale opportunità il Prof. Ing. Nicolò Cavina, per la sua disponibilità e per l'impegno con il quale si dedica ai suoi studenti, facendoli appassionare e stimolandoli continuamente a spingersi oltre.

Ringrazio Ferrari, l'Ing. Luca Poggio, l'Ing. Matteo Tassinari e l'Ing. Elena Ligabue, per avermi dato la possibilità di sviluppare tale progetto, per il tempo dedicatomi e per il supporto ricevuto.

Ringrazio il mio collega Francesco Saverio Del Vecchio, "compagno di viaggio" in questo progetto.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, per l'amore, il supporto ed il sostegno ricevuto in tutta la mia vita.

Senza di loro nulla sarebbe stato uguale.

Grazie a tutti i miei amici, quelli di una vita ed i nuovi arrivati, i vicini ed i lontani, a tutte le persone che mi sono state vicino nel corso della mia vita; ai momenti trascorsi insieme, perché l'importante non è dove, ma con chi...

"Se sono diventato la persona che sono oggi, è anche grazie a tutti voi"