

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Specializzazione in Automazione



Tesi di Laurea

Analisi della funzionalità del sistema e-Pedal
sull'autonomia dei veicoli elettrici

Relatore accademico

Fabio Freschi

Tutor aziendale

Alberto Bertone

Candidato

Giacomo Tartaglia

LUGLIO 2021

Sommario

1 – Il sistema e-Pedal.....	8
1.1 – Descrizione del sistema e-Pedal.....	8
1.2 – Funzionamento del sistema e-Pedal	9
1.3 – Ipotesi di base del sistema e-Pedal	11
1.4 – Sistema Black Box	12
1.5 – Dati di input	13
1.6 – Dati di output.....	14
2 – Frenata rigenerativa.....	15
2.1 – Livelli di frenata rigenerativa	16
3 – Normativa WLTP NEDC e RDE	17
3.1 – Introduzione	17
3.2 – Procedura NEDC	20
3.3 – Procedura WLTP.....	21
3.3.1 – Obiettivo.....	21
3.3.2 – Ciclo WLTP	22
3.3.3 – Procedura del test.....	23
3.3.4 – Risultati attesi.....	25
3.4 – Differenze tra WLTP e NEDC	26
3.5 – Test per auto elettriche e ibride.....	29
3.6 – Procedura RDE	29
3.7 – Dalla normativa al modello.....	30
4 – Modello Simulink.....	31
4.1 – Introduzione	31
4.2 – Layout del modello	32

4.3 – Ciclo WLTP	33
4.4 – Longitudinal Driver	35
4.5 – Blockset Controllers.....	37
4.5.1 – Struttura del blockset controllers.....	37
4.5.1 – Regenerative Braking Control	39
4.6 – Environment.....	40
4.7 – Passenger Car	41
4.7.1 – Electric Plant	42
4.7.2 – Datasheet Battery	43
4.7.3 – Analisi delle potenze	44
4.7.4 – Analisi della tensione della batteria.....	47
4.7.5 – Analisi della corrente	48
4.7.6 – Analisi dello State of Charge – SOC.....	49
4.7.7 – Mapped motor	51
4.7.8 – Drivetrain.....	53
4.7.9 – Wheels and brakes	54
4.7.10 – Vehicle	55
4.8 – Visualization	56
5 – Validazione modello	57
5.1 – Introduzione	57
5.2 - Obiettivo	57
5.3 – Parametri del veicolo.....	58
5.3.1 – Tensione della batteria.....	59
5.3.2 – Capacità della batteria	61
5.3.3 – Parametri fisici del veicolo	62
5.4 – Analisi ed elaborazione dati.....	63

5.5 – Conclusioni.....	68
6 – Logica e-Pedal.....	69
6.1 – Introduzione	69
6.2 – Obiettivi del sistema e-Pedal	69
6.3 – Descrizione della logica dell’e-Pedal ed ipotesi di base.....	70
6.4 – Modulazione della frenata rigenerativa	72
6.4.1 – Lookup table.....	73
6.4.2 – Primo coefficiente di rigenerazione.....	74
6.4.3 – Secondo coefficiente di rigenerazione.....	75
6.4.4 – Terzo coefficiente di rigenerazione.....	79
6.4.5 – Quarto coefficiente di rigenerazione	81
6.4.6 – Descrizione dei guadagni (gain)	84
6.4.7 – Determinazione del coefficiente globale di rigenerazione	87
6.4.8 – Definizione del coefficiente di limitazione della frenata rigenerativa	89
7 – Risultati sulla Nissan Leaf e+ con logica e-Pedal.....	91
7.1 – Prova 1.....	92
7.1.1 – Analisi del profilo di velocità.....	93
7.1.2 – Richiesta di accelerazione e frenata.....	95
7.1.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice.....	100
7.1.4 – Analisi dei coefficienti rigenerativi	104
7.1.5 – Coefficiente rigenerativo ON/OFF in funzione della velocità.....	105
7.1.6 – Coefficiente rigenerativo relativo allo state of charge	107
7.1.7 – Coefficiente di rigenerazione della velocità	108
7.1.8 – Coefficiente di rigenerazione della decelerazione	110
7.1.9 – Coefficiente globale di rigenerazione.....	112
7.1.10 – Coppia frenante rigeneratrice.....	114

7.1.11 – Coppia frenante dissipativa.....	116
7.1.12 – State of charge	118
7.1.13 – Conclusioni relative alla prova 1	119
7.2 – Prova 2.....	120
7.2.1 – Analisi del profilo di velocità.....	121
7.2.2 – Richiesta di accelerazione e frenata.....	124
7.2.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice.....	127
7.2.4 – Coefficiente globale di rigenerazione.....	129
7.2.5 – Coppia frenante rigeneratrice.....	130
7.2.6 – Coppia frenante dissipativa	132
7.2.7 – State of charge	134
7.2.8 – Conclusioni relative alla prova 2	135
7.3 – Prova 3.....	136
7.3.1 – Analisi del profilo di velocità.....	137
7.3.2 – Richiesta di accelerazione e frenata.....	139
7.3.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice.....	140
7.3.4 – Coefficiente globale di rigenerazione.....	142
7.3.5 – Coppia frenante rigeneratrice.....	143
7.3.6 – Coppia frenante dissipativa	144
7.3.7 – State of charge	145
7.3.8 – Conclusioni relative alla prova 3	146
7.4 – Prova 4.....	147
7.4.1 – Analisi del profilo di velocità.....	148
7.4.2 – Richiesta di accelerazione e frenata.....	151
7.4.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice.....	152
7.4.4 – Coefficiente globale di rigenerazione.....	153

7.4.5 – Coppia frenante rigeneratrice.....	154
7.4.6 – Coppia frenante dissipativa	155
7.4.7 – State of charge	156
7.4.8 – Conclusioni relative alla prova 4	157
7.5 – Prova 5.....	158
7.5.1 – Analisi del profilo di velocità.....	159
7.5.2 – Richiesta di accelerazione e frenata.....	161
7.5.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice.....	162
7.5.4 – Coefficiente globale di rigenerazione.....	163
7.5.5 – Coppia frenante rigeneratrice.....	164
7.5.6 – Coppia frenante dissipativa	165
7.5.7 – State of charge	167
7.5.8 – Conclusioni relative alla prova 5	168
7.6 – Prova 6.....	169
7.6.1 – Analisi del profilo di velocità.....	170
7.6.2 – Richiesta di accelerazione e frenata.....	172
7.6.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice.....	173
7.6.4 – Coefficiente globale di rigenerazione.....	174
7.6.5 – Coppia frenante rigeneratrice.....	175
7.6.6 – Coppia frenante dissipativa	176
7.6.7 – State of charge	177
7.6.8 – Conclusioni relative alla prova 6	178
8 – Sistema e-Pedal applicato ad un percorso reale.....	179
8.1 – Introduzione	179
8.2 – Simulazione di un veicolo elettrico tradizionale.....	180
8.2.1 – Introduzione.....	180

8.2.2 – Analisi del profilo di velocità.....	181
8.2.3 – Richiesta di accelerazione e frenata.....	182
8.2.4 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice.....	183
8.2.5 – Coefficiente di rigenerazione	185
8.2.6 – Coppia rigeneratrice.....	186
8.2.7 – Coppia dissipativa.....	188
8.2.8 – State of charge	190
8.3 – Simulazione di un veicolo elettrico con sistema e-Pedal	191
8.3.1 – Introduzione.....	191
8.3.2 – Analisi del profilo di velocità.....	192
8.3.3 – Richiesta di accelerazione e frenata.....	193
8.2.4 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice.....	194
8.3.5 – Coefficiente di rigenerazione	196
8.3.6 – Coppia rigeneratrice.....	197
8.3.7 – Coppia dissipativa.....	199
8.3.8 – State of charge	201
8.4 – Conclusioni relative al percorso reale.....	202
9 – Conclusioni.....	203
9.1 – Ulteriori considerazioni	204
9.1.1 – Tipologia di percorso adottato	204
9.1.2 – Limitatore della coppia rigeneratrice	204
9.1.3 – Sensazione di guida.....	205
9.1.4 – Inquinamento atmosferico	205

1 – Il sistema e-Pedal

1.1 – Descrizione del sistema e-Pedal

Il sistema e-Pedal è il primo pedale elettronico al mondo, nato dall'esigenza di aumentare l'autonomia dei veicoli elettrici e ibridi, focalizzandosi sulle strategie da adottare per recuperare l'energia persa durante il moto della vettura, ed introducendo un nuovo modo di interagire con essa, attraverso l'utilizzo di un solo pedale, che possa agire sia da acceleratore che da freno.

Per una rapida accelerazione, è sufficiente premere a fondo il pedale, mentre sollevando progressivamente il piede da esso si effettua una frenata rigenerativa, di intensità crescente (in base al rilascio del pedale), fino a fermare completamente il veicolo. A seguito del fermo della vettura, viene attivato automaticamente un sistema bloccante che impedisce alla vettura di muoversi, fino a quanto non viene esercitata nuovamente una pressione sul pedale. Ad esempio, se il veicolo si dovesse trovare lungo una strada con pendenza non nulla, tale sistema sarebbe in grado di mantenere stazionaria la posizione del veicolo, fino ad una pendenza massima pari al 30%.

Questo sistema è particolarmente indicato per i viaggi interni alle città dove i cicli di accelerazione e stop sono molto frequenti, riducendo il bisogno di passare da un pedale all'altro, semplificando la guida.

Nello specifico, il sistema e-Pedal lavora sull'energia cinetica che possiede il veicolo, trasformandola in energia elettrica (durante la frenata rigenerativa), attraverso l'utilizzo del motore che viene temporaneamente adottato come un generatore di corrente (invertendo quindi il suo normale funzionamento), evitando così di dissipare l'energia cinetica che, in condizioni normali, e con un classico sistema frenante a dischi, trasformerebbe l'energia cinetica del veicolo in calore, che verrebbe poi disperso nell'ambiente.

1.2 – Funzionamento del sistema e-Pedal

Nel caso della vettura con un unico pedale, partendo da una condizione iniziale a velocità nulla del veicolo, nel momento in cui il conducente esercita una pressione sull'acceleratore, il sistema bloccante del veicolo appena presentato viene disabilitato permettendo al veicolo di potersi muovere, e contemporaneamente viene fornita coppia motrice per l'avanzamento della vettura.

Nel momento in cui il piede viene parzialmente sollevato dall'acceleratore, la coppia motrice erogata inizia a diminuire in modulo, fino a quando viene raggiunta una configurazione intermedia (posizione del pedale), in cui non viene più erogata coppia motrice, e allo stesso tempo non vengono neanche inviati segnali di comando alla centralina per l'attivazione del sistema frenante, lasciando di fatto il veicolo in una condizione di stallo, in cui prosegue il suo percorso per inerzia.

Da questa configurazione intermedia, se il pedale viene rilasciato maggiormente, viene attivato il sistema frenante rigenerativo che sfrutta l'energia cinetica del veicolo e la converte in corrente che alimenta la batteria, ripristinando di fatto lo state of charge della batteria. Se la decelerazione indotta da questo sistema non dovesse essere sufficiente a decelerare quanto richiesto, verrà attivato anche il sistema frenante tradizionale, ovvero i freni a disco (o di altra natura, presenti sul veicolo), che verranno da qui in avanti richiamati sotto il nome di freni dissipativi, dato che di fatto, non ripristinano lo state of charge, ma disperdono energia sotto forma di calore nell'ambiente.

Nella posizione finale in cui il piede è totalmente sollevato dal pedale e non esercita alcuna pressione, possono essere mandati alla centralina di controllo due segnali differenti, a seconda della velocità di crociera del veicolo: se la velocità è diversa da zero, allora verrà inoltrata la richiesta di massima decelerazione, attivando sia la frenata rigenerativa, sia quella dissipativa; se invece la velocità è pari a zero, ovvero il veicolo è in una condizione di fermo, viene attivato il sistema bloccante (precedentemente descritto), fino a quando non verrà esercitata una pressione sul pedale stesso.

Questa tecnologia consente di arrestare il veicolo in salita ed in discesa, senza aver timore che esso si muova per inerzia a causa del proprio peso e della pendenza della strada, bensì iniziando a muoversi solo nel momento in cui gli verrà fornito l'input di muoversi tramite la pressione esercitata sul pedale da parte del conducente.

Questo sistema si trova attualmente sulla vettura elettrica Nissan Leaf, e sulla Ford Mustang Mach-E.

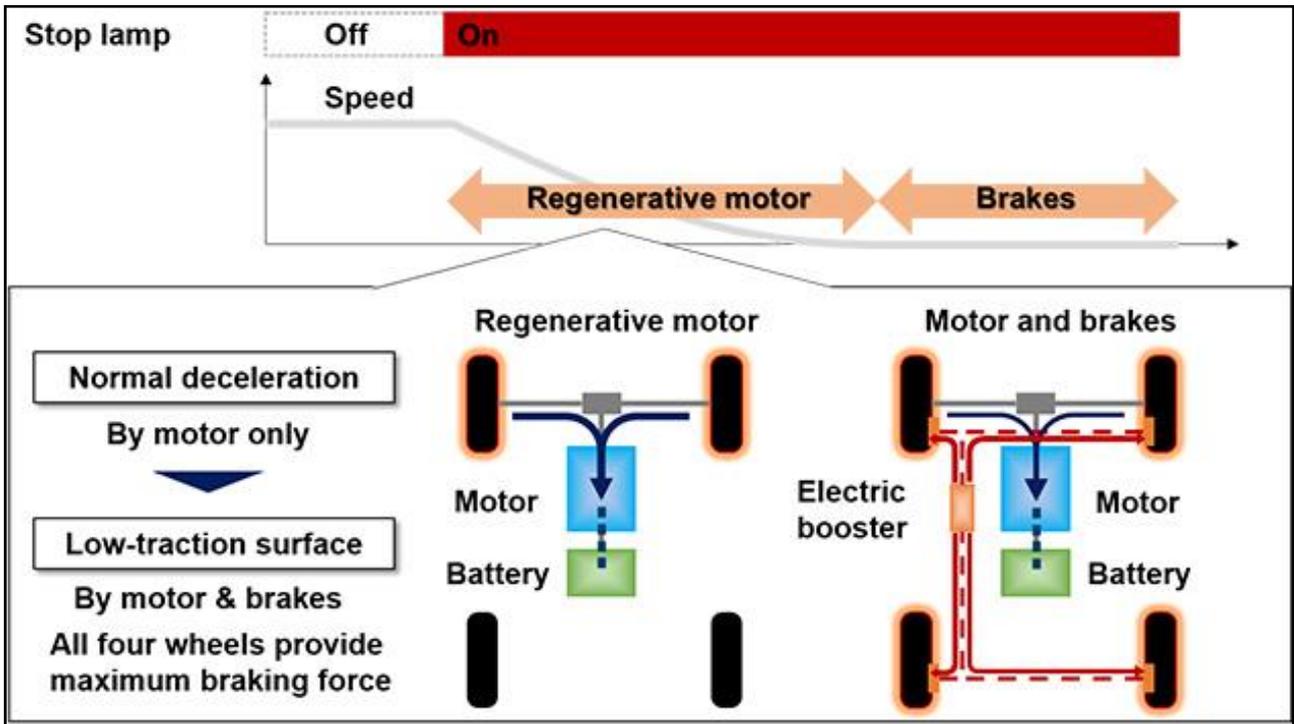


Figura 1: Funzionamento Sistema e-Pedal

1.3 – Ipotesi di base del sistema e-Pedal

Il sistema e-Pedal è concepito come strumento per recuperare l'energia che si trasformerebbe in calore a causa dell'attrito tra disco e pastiglie (per un normale freno a pinze), minimizzando questo meccanismo di perdita energetica (sotto forma di calore).

Normalmente, in presenza di freni a disco (o di altra tipologia, seppur non rigenerativi), una cospicua componente dell'energia cinetica del veicolo viene dissipata sotto forma di calore, per via dell'attrito che si viene a generare tra il disco della ruota e le pastiglie, poste in pressione contro di essa.

Nel caso del sistema e-Pedal, una volta rilasciato il piede dall'acceleratore, la macchina inizia a rallentare come se fosse sotto l'effetto del freno tradizionale (precedentemente definito come dissipativo), mentre in realtà l'energia cinetica del veicolo viene di fatto convertita in energia elettrica per ricaricare la batteria del veicolo. Questo meccanismo inoltre non prevede l'usura dei freni o delle pastiglie, in quanto si tratta solo di invertire il comportamento del motore che non eroga più coppia motrice, ma diventa un generatore durante la fase di decelerazione. Chiaramente, dato che nessun processo è ideale, anche in questo caso si avranno delle perdite connesse a questo meccanismo di ricarica, che si potrebbero attestare attorno al 20% dell'energia totale recuperata in fase di frenatura, che verranno successivamente schematizzate nel modello di riferimento, come un coefficiente rigenerativo pari a 0,8.

Se si considera inoltre che l'energia spesa per far avanzare il veicolo, ovvero l'energia fornite alle ruote, ha un rendimento che si attesta attorno all'80% (quindi sempre con la presenza di perdite), si deduce come il rendimento globale tra l'inviare energia dalla batteria alle ruote e, successivamente, recuperarla da queste ultime per riportarla al motore, si attesta sul 65%. Siamo quindi ben lontani dall'ipotizzare che non ci siano perdite all'interno del sistema e che tutta l'energia sia interamente convertita (o utilizzata).

Un'altra ipotesi semplificativa, riguarda il comportamento delle batterie, immaginandole come degli accumulatori ideali, in grado di ripristinare sempre la carica che gli viene fornita, anche nel caso in cui questi siano completamente saturi, o delle logiche che limitano la ricarica, se al di sopra di un certo valore limite di soglia (ad esempio l'80% della carica totale), trascurando di fatto tutte le teorie per la salvaguardia della salute a lungo termine della batteria stessa.

Inoltre, vi sono anche ulteriori parametri, come la capacità e la potenza massima che sono in grado di ricevere. Con il termine capacità si intende la capacità elettrica della batteria del veicolo, l'attitudine di un corpo conduttore ad accumulare carica elettrica, e non dipende dal materiale da cui è costituito ma solo dalle sue caratteristiche geometriche, come forma e dimensioni, e dalla sua posizione rispetto ad altri conduttori, soprattutto rispetto a conduttori vicini messi a terra. Un dispositivo elettrico dotato di capacità è detto capacitivo, ed un primo esempio è dato da un comune condensatore. Con il termine potenza massima, si indica invece il livello di potenza che la batteria è in grado di assorbire, e superato il quale la batteria non riesce più ad assorbirne ulteriormente perché supera le proprie caratteristiche tecniche.

Di queste due parametri, il secondo risulta essere quello più problematico, in quanto legato a delle caratteristiche limiti del componente, che a meno di ulteriori studi e ricerche non possono essere migliorati. Al contrario, il primo parametro, che indica la possibilità della batteria di essere ricaricata, è sempre soddisfatto, dato che raramente la batteria sarà al 100% della propria carica, in concomitanza con l'attivazione della ricarica rigenerativa.

1.4 – Sistema Black Box

Se immaginassimo il sistema e-Pedal come una Black Box, è possibile andare a definire quali sono i parametri di input ed i parametri di output, in maniera da avere già in prima battuta una visione globale di cosa andare a studiare, di quali fenomeni tenere in considerazione, di quali ipotesi adottare e quali possono essere gli argomenti che collegano i vari elementi della Black Box, per poterli andare a simulare ed analizzare in un secondo momento tramite la scrittura di linguaggi di programmazione.

1.5 – Dati di input

I dati di input che vede la Black Box, ovvero tutto il sistema e-Pedal, sono di seguito elencati, con una breve descrizione di come trattarli ai fini del miglioramento dell'efficienza della vettura per una maggiore percorrenza su strada:

- Velocità di percorrenza: questo parametro influenza profondamente il consumo energetico della vettura (specie sui tratti a lunga percorrenza e percorsi a velocità sostenuta), ed è vincolante per l'attivazione od il passaggio tra i diversi livelli di frenata rigenerativa (ove previsti);
- Segnali stradali: se letti ed interpretati dalla vettura, possono andare a influenzare lo stile di guida del conducente con l'aggiunta di parametri alla guida quali una velocità massima da rispettare o lo stile di guida (sportivo, ECO, cauto, e altre ancora);
- Forza/pressione agenti sul pedale da parte del conducente: questo parametro è il cardine su cui si basa tutto il funzionamento del sistema e-Pedal e che determina il comportamento su strada della vettura;
- State of charge: in funzione della carica residua rimasta, si può scegliere che stile di guida adottare, e quali accorgimenti prendere, consigliati a video sul cruscotto o sullo schermo touch. In alternativa, si possono visualizzare i km di autonomia rimanenti fino ad esaurimento carica;
- Stile di guida: questo parametro può influenzare significativamente le prestazioni del veicolo in termini di carica residua e di efficienza, perché consente/vieta forti accelerazioni, così come delle prestazioni più o meno dinamiche alla guida;
- Meteo: le condizioni climatiche esterne influenzano fortemente l'autonomia del veicolo, quindi in funzione di queste, si può decidere di impostare manualmente o attraverso la centralina di controllo una tipologia di stile di guida che sia maggiormente improntato al risparmio energetico, con l'attivazione del sistema e-Pedal su alti livelli di performance energetici;
- Pendenza strada: anche questo parametro influenza profondamente il controllo della vettura da parte dell'e-Pedal, in quanto per tratti di strada in discesa il sistema di frenata rigenerativa può immagazzinare una quantità non indifferente di carica elettrica, incrementando la percorrenza possibile del veicolo.

1.6 – Dati di output

I dati di output che vede la Black Box, sono di seguito elencati, con una breve descrizione di come valutarli ed analizzarli ai fini del miglioramento dell'efficienza della vettura per una maggiore percorrenza su strada:

- Coppia richiesta al motore: in funzione della forza/pressione sul pedale viene richieste una coppia al motore per far avanzare il veicolo;
- State of charge: in funzione di questo parametro, possono essere visualizzate a schermo le contromisure per salvaguardare la carica residua del veicolo, oppure la centralina può intervenire direttamente per regolare i parametri di guida in base alla migliore previsione di ottimizzazione.
- Lettura sterzo: l'angolo di rotazione dello sterzo può essere letto come input dalla centralina, ed attraverso un sistema di ottimizzazione del percorso e di previsione del percorso, può essere modificato il livello di intensità del sistema e-Pedal, anche per accompagnare la guida nelle curve o nel percorso attuale.

Si puntualizza che il parametro dello state of charge, è sia un dato in input, sia un dato di output, dato che viene inizialmente letto come dato di input, per poi essere rivalutato dalla logica di gestione della carica residua della batteria, viene elaborato come dato di output, ed inserito nuovamente nel modello come un nuovo dato di input. Pertanto è stato elencato sia tra le variabili di input che di output.

2 – Frenata rigenerativa

Il principio su cui si basa la ricarica rigenerativa, consiste nell'invertire il funzionamento del motore elettrico: quando si solleva il pedale o si frena leggermente, invece di convertire la corrente in movimento il motore si trasforma in alternatore e riconverte l'energia cinetica del veicolo in corrente elettrica. Per questo motivo, l'impianto frenante di un'elettrica funziona un po' diversamente da quello di un'auto tradizionale: nella prima fase del rilascio o in caso di frenate leggere infatti, lascia che sia il sistema elettrico a lavorare, mentre se la pressione sul pedale si fa più decisa chiama in causa i freni veri e propri.

Un motore elettrico è costituito da una parte ferma detta statore al cui interno ruota un componente detto rotore, collegato alla trasmissione e quindi alle ruote. Lo statore è formato da una serie di avvolgimenti di cavi in cui scorre la corrente elettrica erogata dalla batteria, che genera un campo magnetico. Sul rotore invece possono essere presenti dei magneti o altri avvolgimenti in cui scorre corrente elettrica che genera campi magnetici. L'interazione tra questi campi magnetici genera la coppia, ossia la forza che agisce sul motore e quindi sulle ruote. In frenata invece il motore agisce da generatore. Il rotore è messo in moto dalle ruote che stanno continuando a girare. Grazie al fenomeno fisico dell'induzione elettromagnetica, i magneti rotanti con il rotore inducono, ossia generano della corrente elettrica nei cavi dello statore. Questa corrente ha direzione opposta rispetto al caso precedente ed è diretta verso la batteria. Di conseguenza anche la coppia che agisce sul rotore ha verso opposto e anziché spingere la vettura la rallenta. Il sistema di frenata rigenerativa si comporta quindi come un vero e proprio freno, con effetto simile al freno motore.

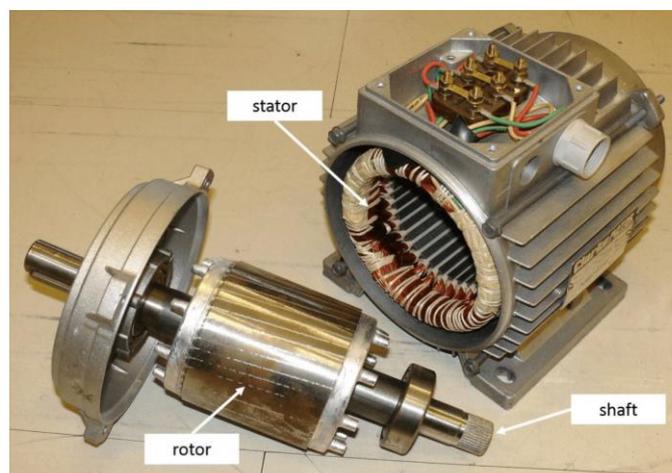


Figura 2 - Rotore e statore di un motore elettrico

2.1 – Livelli di frenata rigenerativa

Il sistema e-Pedal, nel momento in cui entra in funzione per recuperare energia elettrica in fase di frenata, agisce da freno motore sul veicolo. L'intensità con cui agisce però può essere in alcuni casi modificabile dal conducente, oppure dalla centralina di comando, in funzione di vari parametri (interni ed esterni al veicolo) oppure semplicemente per volere del conducente. Alcuni esempi si trovano installati alcune auto elettriche quali la Nissan Leaf, la Hyundai Kona, Renault Zoe, Tesla Model 3, attivabili mediante pulsanti, leve, o dal touch screen, per variare l'intensità della frenata rigenerativa su vari livelli. Anche scegliendo la massima intensità, comunque, la decelerazione solitamente assomiglia al doppio o al massimo al triplo della decelerazione ottenuta col freno motore di un'auto convenzionale a motore termico, e raramente la sua intensità supera quella dell'accelerazione che il motore elettrico è in grado di imprimere alla vettura. Per riferimento, una frenata dissipativa al limite di aderenza (su fondo buono e con ottime gomme adatte alla stagione) produce decelerazioni intorno a 1 g. Non è possibile andare oltre questo livello di decelerazione: se si supera il limite di aderenza si avrà il bloccaggio delle ruote (o l'intervento dell'ABS per evitarlo).

3 – Normativa WLTP NEDC e RDE

3.1 – Introduzione

Nel 2010, solo nell'Unione Europea sono stati emessi 4,72 miliardi di tonnellate di CO₂, il 19% dei quali a causa del traffico stradale. Pertanto, l'UE aveva deciso di ridurre le emissioni del 20% entro il 2020. Si trattava di un obiettivo raggiungibile attraverso l'implementazione del ciclo WLTP, che avrebbe consentito di analizzare le emissioni di CO₂ e di NO_x.

A partire dal primo settembre 2017 il protocollo NEDC (New European Driving Cycle) è stato sostituito del protocollo WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicle Test procedure), svolto sia in laboratorio con cicli più realistici, sia con prove su strada denominate RDE (Real Driving Emissions), al fine di rilevare gli ossidi di azoto NO_x, così da poter valutare in maniera quanto più accurata possibile i dati di consumo ed inquinamento delle nuove vetture, ed evitare che quanto dichiarato dai costruttori sia difforme dalla realtà, così come avveniva in passato, con la normativa NEDC, che veniva condotta tramite test in laboratorio, in condizioni favorevoli per il basso livello di inquinanti registrati, e che non rispecchiavano i normali parametri della vettura durante la guida su strada.

Il vecchio ciclo di guida Europeo (NEDC – New European Driving Cycle), introdotto negli anni '80, si basava sulla ripetizione di quattro cicli "urbani", a una velocità massima di 50 km/h, e uno extraurbano, alla velocità massima di 120 km/h. Essendosi dimostrato poco realistico, è oramai di fatto superato.

I costruttori, inoltre, a partire dal mese di settembre 2018, sono obbligati a sottoporre le proprie vetture al test RDE. Tramite questo test, verranno rilevate direttamente su strada le emissioni di sostanze inquinanti come, ad esempio, le polveri sottili PM10 e PM2.5, così da ottenere dati confrontabili con la guida reale.

Il WLTP garantisce una maggiore trasparenza nel raffronto tra i consumi energetici e le emissioni di CO₂ di differenti veicoli. I valori di misurazione sono quindi indipendenti dalle case automobilistiche e dal modello di veicolo, e sono tendenzialmente superiori a quelli del ciclo NEDC. È pertanto possibile prevedere che singoli modelli e i relativi motori verranno ottimizzati ai fini della tutela del clima.

Per questo motivo, a partire dal primo settembre 2018, tutti i costruttori dell'Unione Europea hanno avuto l'obbligo di produrre esclusivamente veicoli testati in conformità con le procedure WLTP.

La nuova procedura di prova WLTP è più rappresentativa delle attuali condizioni di guida rispetto alla procedura NEDC, ma non può prendere in considerazione tutti i casi possibili incluso l'effetto dovuto allo stile di guida che è proprio di ogni singolo guidatore.

Pertanto, rimarrà ancora una differenza tra le emissioni ed i consumi rilevati in laboratorio e quelli derivanti dall'utilizzo del veicolo nel mondo reale e l'entità di tale differenza dipenderà da fattori come il comportamento di guida, l'uso di sistemi di bordo (es. climatizzatore), il traffico e le condizioni meteorologiche che sono caratteristiche di ogni area geografica e di ogni guidatore

Per questa ragione solo un test di laboratorio standardizzato permette di ottenere valori con cui sia possibile confrontare in modo equo veicoli e modelli differenti.

Sulla base dei dati reali raccolti a livello mondiale, in futuro il WLTP fornirà dati di consumo più realistici. Le emissioni e i consumi di carburante possono variare sulla base del comportamento di guida e degli equipaggiamenti presenti su ciascun veicolo. Un esempio rilevante è l'uso prevalentemente urbano piuttosto che extraurbano od autostradale. Per poter ponderare tali differenze, sulla base delle condizioni teoriche del ciclo NEDC, è stato sviluppato un profilo di guida dinamico, basato su rilevamenti statistici e sull'analisi dei profili medi degli utilizzatori; complessivamente vengono considerate maggiori accelerazioni, una velocità media più elevata e una velocità massima superiore. Anziché simulare ciclo urbano e ciclo extraurbano in un calcolo combinato, il veicolo viene ora testato in quattro fasi caratterizzate da differenti range di velocità.

Inoltre, il nuovo ciclo WLTP farà risultare inevitabilmente più alte le emissioni, creando non pochi problemi ai produttori che dovranno misurarsi con standard sempre più esigenti e con legislazioni stringenti.

Al momento si prevede un aumento generale dei livelli di CO₂ WLTP fino al 25% (auto per produttore), a causa delle nuove regole e modalità di acquisizione dei dati e delle prove su strada, che saranno più severe e maggiormente proiettate verso la salvaguardia dell'ambiente e del clima. Pertanto, sarà molto importante analizzare l'impatto esatto dei nuovi valori di inquinanti sulla lista dei veicoli disponibili.

I valori delle emissioni e dei consumi di carburante misurati secondo il WLTP devono essere indicati dal 1° settembre 2017 per i nuovi tipi di autovetture M1 ed autocarri N1 leggeri. Ciò vale in Europa e in molti altri Paesi a livello mondiale. Sono interessati solo veicoli con massa di riferimento inferiore a 2.610 kg che vengono omologati nella cosiddetta procedura per veicoli leggeri. Nel quadro di questa procedura l'intero veicolo viene posto su un banco dinamometrico a rulli.

Attualmente non sono interessati i veicoli pesanti, per i quali è prevista l'omologazione in base ad una procedura specifica nell'ambito della quale viene posto sul banco di prova solo il motore.

I risultati delle analisi degli inquinanti delle vetture vengono svolti grazie ai pems (Portable Emission Measurement System), ovvero dei sistemi portatili di misurazione delle emissioni dei veicoli, di piccole dimensioni, che consentono di essere trasportati all'interno della vettura che viene utilizzata durante il test, in maniera da monitorare in tempo reale le emissioni reali del veicolo.

3.2 – Procedura NEDC

Il ciclo d'omologazione NEDC (la sigla sta per New European Driving Cycle), è stato introdotto nel 1997, ma che ora è caduto in disuso, perché sostituito dal ciclo WLTP. Il ciclo NEDC consiste nell'effettuare un test condotto su un banco a rulli installato in un ambiente a temperatura controllata, sopra il quale l'auto accelera e decelera seguendo una sequenza predeterminata. La sua inattendibilità risiede soprattutto nel fatto che le variazioni di velocità avvengono molto gradualmente, che il motore è poco sfruttato e che si simulano due soli scenari di guida (ambiente urbano ed extraurbano). Durante la prova, il climatizzatore viene tenuto spento (e di conseguenza il motore eroga meno energia), le ruote non curvano (un vantaggio per le auto con servosterzo elettrico, che assorbe potenza solo quando si gira il volante) e non ci sono cambi di pendenza: tre vantaggi che in realtà permangono pure nella nuova procedura WLTP.

Nello specifico, i valori dei parametri principali di questo ciclo erano i seguenti:

- Tempo ciclo = 20minuti;
- Distanza percorso = 11 km;
- Velocità massima 120 km/h;
- Velocità media 34 km/h;
- Fasi di guida = 2, urbano ed extraurbano;
- Influenza degli equipaggiamenti della macchina: non considerato;
- Cambio marcia: punti di cambio marcia definiti;
- Tempo di fermata 24%.

Questi parametri appena elencati sono caratteristici di cicli standard NEDC, in vigore fino al primo settembre 2017, sostituiti da nuovi parametri della normativa WLTP, di seguito descritti.

3.3 – Procedura WLTP

3.3.1 – Obiettivo

Uno degli obiettivi principali del metodo WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure) è ottenere un rilevamento standardizzato delle emissioni di gas di scarico e del consumo energetico per le differenti modalità di trazione, come per esempio benzina, Diesel, gas metano o veicoli elettrici. Con il ciclo WLTP, eseguendo correttamente la procedura di misurazione, un veicolo di un medesimo modello deve fornire lo stesso risultato del test in tutte le aree del mondo. È anche la necessità di questa confrontabilità ciò che rende indispensabile una misurazione in laboratorio. Pertanto, consumi ed emissioni vengono rilevati sul banco di prova, in modo affidabile e rappresentativo, simulando un profilo di guida dinamico.

La riduzione di CO₂ è un tema centrale nello sviluppo dei veicoli. Grazie al WLTP è possibile verificare in modo tracciabile l'osservanza delle specifiche internazionali sui valori limite delle emissioni di CO₂ e di NO_x.

In generale, la finalità per le quali è stato introdotto il WLTP è quello di obbligare i costruttori alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica, ma per ottenere l'omologazione si è riscontrato un aumento dei consumi auto che complica gli sforzi delle case automobilistiche per rientrare nei valori limite di CO₂ imposti. Naturalmente questo parametro non influisce per i veicoli elettrici, dato che non hanno emissioni di CO₂.

3.3.2 – Ciclo WLTP

Il ciclo WLTP definisce una norma armonizzata globale per determinare i livelli di inquinanti, le emissioni di CO₂, il consumo di carburante o di energia elettrica (per i veicoli plug-in o puramente elettrici), delle autovetture e furgoni commerciali leggeri, con massa non superiore ai 2610 kg, attraverso una procedura più rigorosa, assieme alla determinazione di CO₂ o di NO_x o più in generale di consumo di carburante o di energia elettrica, tenendo in considerazione una serie di parametri ben definiti quali: il cambio di marcia, il peso della vettura (inclusi passeggeri, eventuali merci ed optional presenti a bordo), la tipologia e qualità del carburante, la temperatura ambiente, il tipo di pneumatici e le dimensioni dei cerchi, la tipologia di guida, l'ambiente interno e il sistema di infotainment.

In particolare:

- All'aumentare delle dimensioni dei cerchi, diminuisce l'autonomia;
- Si ha il massimo dell'efficienza per una temperatura esterna dell'ambiente intorno ai 25-30 °C.

In ogni caso anche questo metodo non può essere considerato affidabile al 100% perché il numero di variabili in gioco è troppo alto, e non tutte possono essere prese in considerazione in una fase di test. Nella realtà, così come per i veicoli tradizionali, ci si renderà conto della reale autonomia dell'auto elettrica solo dopo averla guidata per un certo periodo, e sarà legata allo stile di guida, alle strade percorse, al clima, ed ai parametri precedentemente elencati.

3.3.3 – Procedura del test

La procedura di test WLTP fornisce un algoritmo per il calcolo dei punti di cambiata ottimali (punti di cambio marcia), tenendo conto del peso totale del veicolo e delle curve di potenza a pieno carico entro i regimi normalizzati del motore, coprendo l'ampia gamma di velocità di rotazione e potenza del motore consentite dalla tecnologia corrente. Per rispecchiare l'uso pratico e lo stile di guida efficiente dal punto di vista del carburante, i cambi di marcia frequenti che avvengono in meno di cinque secondi vengono filtrati.

Vengono applicati tre diversi cicli di prova WLTP, a seconda della classe del veicolo definita dal rapporto peso/potenza PW_r , misurato in kW/T (potenza nominale motore/peso a vuoto):

- Classe 1 - veicoli a bassa potenza con $PW_r \leq 22$;
- Classe 2 - veicoli con $22 < PW_r \leq 34$;
- Classe 3 - veicoli ad alta potenza con $PW_r > 34$.

Le auto più comuni hanno oggi rapporti di potenza di 40-100 kW per ogni tonnellata, quindi appartengono alla classe 3.

In ogni classe, ci sono diversi test di guida progettati per rappresentare il funzionamento di veicoli reali su strade urbane ed extraurbane ed autostrade. La durata di ogni parte è fissata tra le classi, tuttavia le curve di accelerazione e velocità hanno una forma diversa. La sequenza di prove è ulteriormente limitata dalla velocità massima del veicolo.

Ad ogni classe corrispondono piccoli adeguamenti nelle procedure (come accelerazioni meno rapide per le auto pesanti ma poco potenti).

La procedura di test fornisce una guida rigorosa per quanto riguarda le condizioni dei test dinamometrici e del carico stradale (resistenza al movimento), cambio marcia, peso totale della vettura (includendo equipaggiamenti opzionali, merci e passeggeri), qualità del carburante, temperatura ambiente e selezione e pressione degli pneumatici, allestimento del veicolo (dalla versione base al top di gamma).

Tra le condizioni previste in fase di test, nella procedura WLTP troviamo:

- Un comportamento di guida più realistico;
- Situazioni di guida differenziate, che includano circuiti urbani, extra-urbani, statali e autostrade;
- Distanze più lunghe;

- Stili di guida che includano accelerazioni e frenate più simili ad un andamento reale;
- Velocità medie e massime maggiori;
- Temperature ambientali più realistiche.

Il test è suddiviso in quattro fasi, e riproduce le condizioni più simili alla guida reale, considerando l'influenza degli accessori che modificano il peso della vettura, l'aerodinamica, la resistenza al rotolamento e quella dei sistemi elettronici che consentono la scelta fra più modalità di guida. Per ogni modello, il costruttore potrà così fornire sia un valore peggiore, sia uno migliore.

Per verificare la veridicità dei dati, inoltre, il test WLTP prevede una prova consumi auto con quattro differenti velocità medie, così da ottenere un riscontro quanto più fedele alla realtà in base ai diversi stili di guida adottati dagli automobilisti.

L'omologazione WLTP impone ai costruttori di effettuare i test richiesti sia con le vetture dotate della dotazione di accessori di serie, sia con le versioni top di gamma. Questa è un'altra differenza rispetto al passato perché i test venivano effettuati con le sole vetture nell'allestimento base, con dati finali migliori in termini di consumi, rispetto alle medesime vetture, ma al top di gamma, con maggiori optional.

3.3.4 – Risultati attesi

Con l'introduzione della procedura WLTP, ci si aspetta un aumento dei valori medi di CO₂. Come conseguenza, le aziende che hanno incluso i limiti di CO₂ nelle loro car policy hanno la necessità di rivedere la propria policy ed eventualmente modificarla. Inoltre, per determinare le emissioni di NO_x, l'auto viene provata anche su strada (ogni casa può scegliere il percorso preferito, purché rispetti una lista di parametri): i dati rilevati non devono divergere troppo da quelli di laboratorio. In questi test, i gas sono analizzati da dispositivi montati sulla vettura, i cosiddetti Pems, ma che non vengono tenuti in considerazione per i veicoli puramente elettrici, dato che non vi sono emissioni di CO₂.

3.4 – Differenze tra WLTP e NEDC

Attualmente nelle valutazioni di alcune case automobilistiche si trovano ancora riferimenti sia al metodo NEDC e al WLTP, anche se dal settembre 2017 il metodo NEDC è in fase di dismissione e più di frequente troviamo solo il consumo o l'autonomia basati sul metodo WLTP.

In generale, il test WLTP prevede una durata della prova di 30 minuti, mentre per ottenere la precedente omologazione NEDC la stessa era di 20 minuti.

La velocità media che dovrà sostenere il veicolo sottoposto al test WLTP sarà superiore. Con la nuova normativa questa sarà pari a 46,5 Km/h, mentre in precedenza la velocità media era di 34 Km/h.

La velocità massima da raggiungere è aumentata, passando dai 120 km/h del ciclo NEDC ai 131 km/h con il ciclo WLTP.

La distanza da percorrere per superare la procedura WLTP è più che raddoppiata, poiché si passa dai precedenti 11 chilometri con ciclo NEDC agli attuali 23,25 km per il ciclo WLTP.

Le accelerazioni per il ciclo WLTP sono più decise, con il passaggio da 0 a 50 km/h in 15 secondi, contro i precedenti 26 secondi del metodo NEDC.

A partire dall'avviamento a freddo, con l'auto sul banco prova a rulli vengono misurati quattro range di velocità: da 60 si arriva a 80, poi a 100 e infine fino a 131 km/h. All'interno di queste fasi si susseguono ripetutamente accelerazioni e frenate. Ne consegue che la velocità massima è di 10 km/h più elevata rispetto al vecchio ciclo NEDC mentre la velocità media è di circa 47 km/h, rispetto ai circa 33 km/h del passato. Il tutto per una durata di circa 30 minuti, 10 in più rispetto al NEDC. Anche la lunghezza del tragitto è aumentata: 23 anziché 11 chilometri.

Da notare infine gli altri fattori che influenzano l'autonomia di un veicolo:

- Temperatura esterna;
- Stato di carica e condizioni delle batterie;
- Stile di guida;
- Carico del veicolo;
- Elettronica del veicolo;
- Parametri di riscaldamento e condizionamento dell'abitacolo.

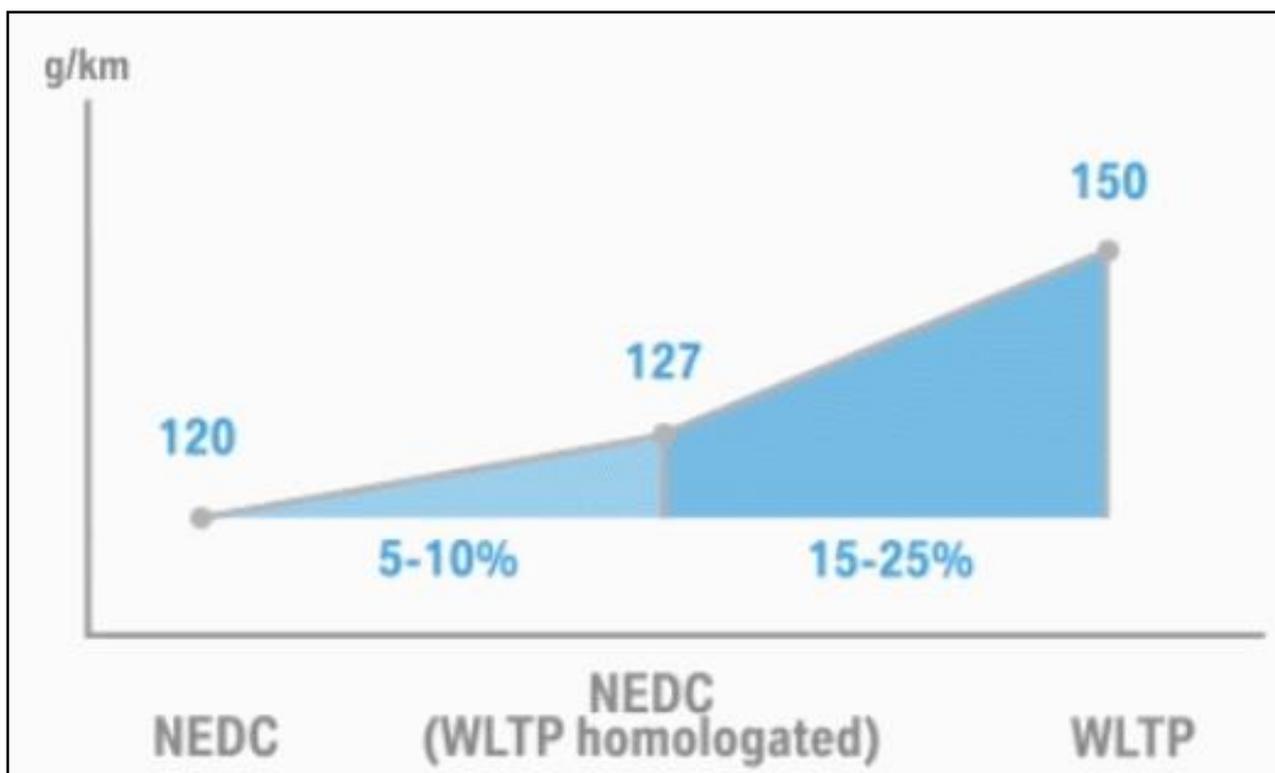


Figura 3: Confronto tra NEDC e WLTP

Si nota quindi, come in generale i consumi per il nuovo ciclo WLTP siano aumentati rispetto al vecchio ciclo NEDC, con le case automobilistiche che dovranno prestare maggiormente attenzione a questi parametri, al fine di poter omologare le proprie vetture, con parametri e limiti massimi di inquinanti sempre più stringenti.

Si riporta quindi in Figura 4 una tabella riassuntiva con le principali differenze tra le due tipologie di ciclo, per avere un confronto diretto.

	NEDC	WLTP
Numero di test	1	Fino a 4
Durata	20 minuti	30 minuti
Distanza	11 km	23,25 km
Fasi di guida	2 66% urbano, 34% non-urbano	4 52% urbano, 48% non-urbano
Velocità media	34 km/h	46,5 km/h
Velocità massima	120 km/h	131 km/h
Impatto optional	No	Si
Cambio di marcia	Fisso	Variabile
Temperatura del test	Tra 20-30°C	Fisso a 23°C

Figura 4: Tabella riassuntiva delle differenze tra NEDC e WLTP

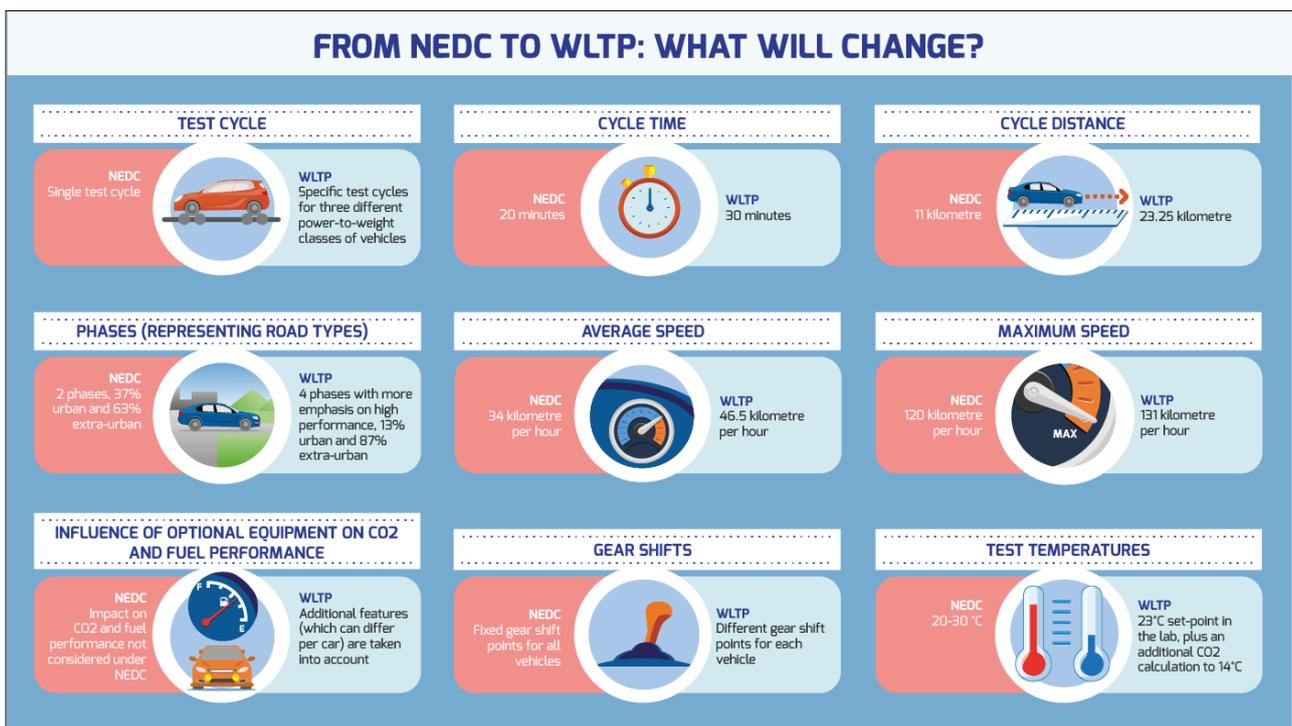


Figura 5: Variazioni tra i cicli NEDC e WLTP

3.5 – Test per auto elettriche e ibride

Per le auto ibride, il ciclo WLTP può essere eseguito in due modi differenti: il primo prevede un mantenimento dello stile di guida maggiormente improntato al risparmio energetico, mentre il secondo non ha particolari specifiche da soddisfare, considerato quindi come uno stile di guida standard, normale. D'altro canto, per le vetture elettriche, così come per le ibride plug-in ricaricabili via cavo, è previsto un secondo ciclo minore, i cui risultati vengono comunicati separatamente e che comprende solo le fasi di guida urbana e a media velocità, in modo tale da poter riscontrare dei risultati molto simili a quelli riscontrabili per le altre prove.

3.6 – Procedura RDE

La prova RDE (Real Driving Emissions) è una prova focalizzata sulla verifica delle emissioni su strada, che verifica se le autovetture mantengono dei valori delle emissioni contenuti, anche in condizioni di guida reale su strada. Il test RDE non sostituisce la prova di laboratorio WLTP, ma la integra. Durante la prova RDE, la vettura viene guidata su strada in una vasta gamma di condizioni diverse, tra cui:

- Alitudini e temperature differenti;
- Un carico utile aggiuntivo;
- Guida in salita e in discesa;
- Strade urbane a bassa velocità di crociera;
- Strade extraurbane a velocità media;
- Autostrade ad alta velocità.

Per misurare le emissioni di inquinanti durante la guida del veicolo su strada, le autovetture che effettuano il test sono dotate di sistemi di misurazione portatili (PEMS) che forniscono un monitoraggio completo in tempo reale dei principali inquinanti emessi dal veicolo.

I limiti da non superare sono definiti come quelli previsti nella prova di laboratorio (WLTP) moltiplicati per i fattori di conformità. Questi ultimi tengono conto del margine di errore della strumentazione che non misura allo stesso livello di accuratezza e ripetibilità di quella utilizzata nella prova in laboratorio.

3.7 – Dalla normativa al modello

Una volta definiti e compresi tutti i limiti imposti dalle normative, necessari per poter omologare una vettura, occorre effettuare dei test su strada, in modo da verificare che tutti i parametri siano contenuti all'interno dei limiti consentiti dalle suddette normative. Per ovviare a questo problema, ovvero quello di dover eseguire molteplici prove su strada, è nata l'esigenza di creare un modello software di riferimento, cioè un modello della vettura impiegata durante i test su strada, sul quale poter effettuare queste analisi, in modo da limitare al minimo le prove lungo un tracciato fisico reale, eseguendole solo nel caso in cui queste siano strettamente necessarie, o per una prova generale di conferma.

In quest'ottica, è stato creato un modello in ambiente Simulink che riesce a simulare l'andamento dell'autonomia (state of charge) di un veicolo puramente elettrico, implementando i dati specifici di quella vettura, e rendendo i valori dedotti dalla simulazione, quanto più vicini ai dati reali, andando di fatto a limitare il numero di prove su strada necessarie per omologare il veicolo.

Nello specifico, tutti i vincoli ed i limiti imposti dalle normative, sono stati modellizzati attraverso la definizione di un profilo di velocità, ovvero il profilo di velocità del ciclo WLTP classe 3, che deve essere seguito dal modello del veicolo in ambiente Simulink, affinché la prova possa essere ritenuta valida.

4 – Modello Simulink

4.1 – Introduzione

Il modello di veicolo elettrico realizzato in ambiente Simulink, permette di implementare i dati di una specifica vettura, simulare una prova su strada, ed supervisionare il comportamento del veicolo, monitorando i parametri quali lo state of charge (SOC), la corrente utilizzata dalla batteria del veicolo, la velocità, l'accelerazione, la coppia motrice, la coppia frenante rigenerativa (e quella dissipativa), e altri ancora, tutti con i corrispettivi grafici, in modo da poter stimare quali di essi influenzano maggiormente il processo di ricarica attraverso la frenata rigenerativa, e quali di essi consumano il maggior quantitativo di energia, al fine di ottimizzare la logica del processo di frenata rigenerativa, per incrementare lo state of charge e quindi l'autonomia della vettura stessa. Il tutto, a parità di altri parametri quali le condizioni climatiche, le condizioni di pendenza della strada o simili.

Nel seguito verranno eseguite diverse prove e con una combinazione sempre differente dei parametri in ingresso relativi ai parametri fisici veicolo e della batteria, per valutare quale sia la condizione migliore di guida, in ottica di risparmio energetico, e di come possa poi essere attuata concretamente questa strategia, applicandola ad un caso reale.

Nello specifico, il modello in ambiente Simulink avrà il compito di leggere come parametri di ingresso le caratteristiche fisiche del veicolo, le caratteristiche dell'impianto batteria, definire la logica con la quale verranno gestite tutte queste variabili, elaborare la coppia frenante rigenerativa esercitata in fase di decelerazione, simulare il comportamento del veicolo e della ricarica che ne consegue, e tracciare l'andamento dello state of charge del veicolo come dato finale di output.

4.2 – Layout del modello

Il layout principale del modello contiene i blocchi fondamentali in cui esso si articola, grazie ai quali si definisce il ciclo di guida, si definiscono le condizioni ambientali, si elaborano i dati per monitorare il comportamento della vettura e della batteria, e si valuta lo stile di guida che assume il conducente, attraverso un'analisi relativa alla pendenza dei pedali di acceleratore e freno nel corso del tempo.

Analogamente, per quanto riguarda il sistema monopedalico dell'e-Pedal, si andrà a valutare lo stile di guida del conducente, attraverso l'analisi relativa all'inclinazione del pedale, che andrà a sostituire i due pedali tradizionali di freno e acceleratore. Se ne valuterà l'andamento della pendenza nel tempo, la richiesta di coppia frenante e di come essa venga elaborata ed applicata per ripristinare lo state of charge, concludendo con l'analisi delle curve relative ai principali parametri che saranno oggetto delle simulazioni e che determineranno l'autonomia del veicolo.

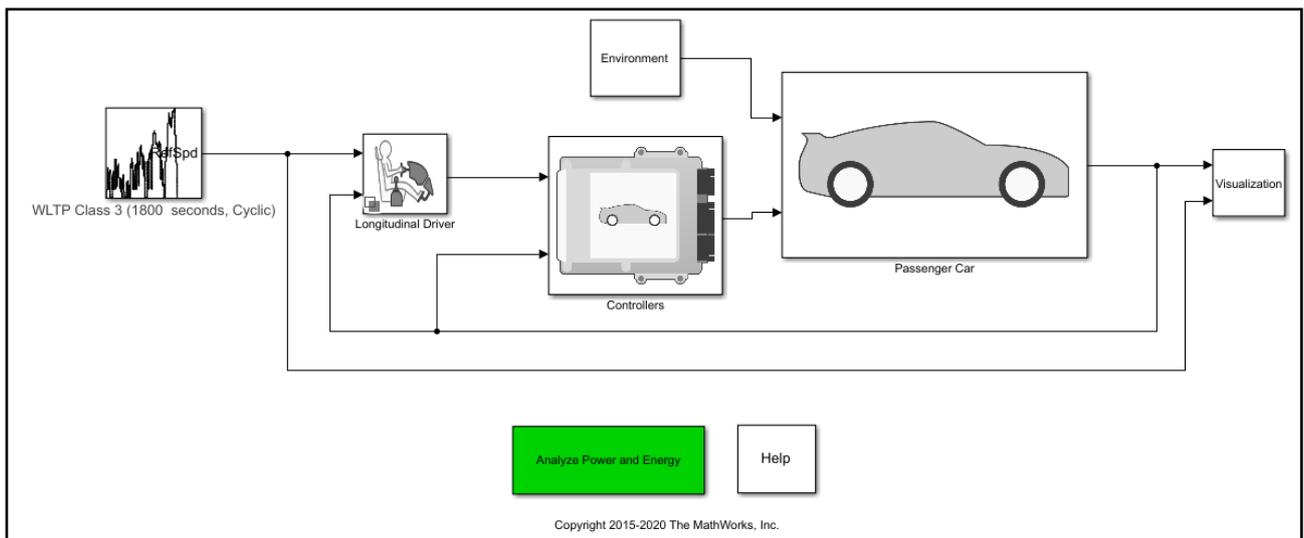


Figura 6 – Layout del modello

4.3 – Ciclo WLTP

Il primo blocco del modello rappresenta il profilo di velocità che viene eseguito dal veicolo, e viene qui definito come il ciclo WLTP classe 3, standardizzato ed approvato a livello internazionale per la valutazione dell'impatto ambientale, e per testare l'autonomia della vettura. Nel caso in esame il modello del ciclo WLTP è stato fornito con un pacchetto aggiuntivo dal sito della MathWorks®, ed implementato in questo modello, in quanto originariamente non era presente nel modello di base in ambiente Simulink. Nello specifico, in Figura 7 viene riportato l'andamento della velocità che la vettura è tenuta a rispettare durante lo svolgimento della prova, mentre in Figura 8 Figura 8 – Profilo di accelerazione del ciclo WLTP vengono riportate le corrispettive accelerazioni che deve effettuare il conducente. Il tutto per un intervallo di 30 minuti, così come stabilito dalla normativa.

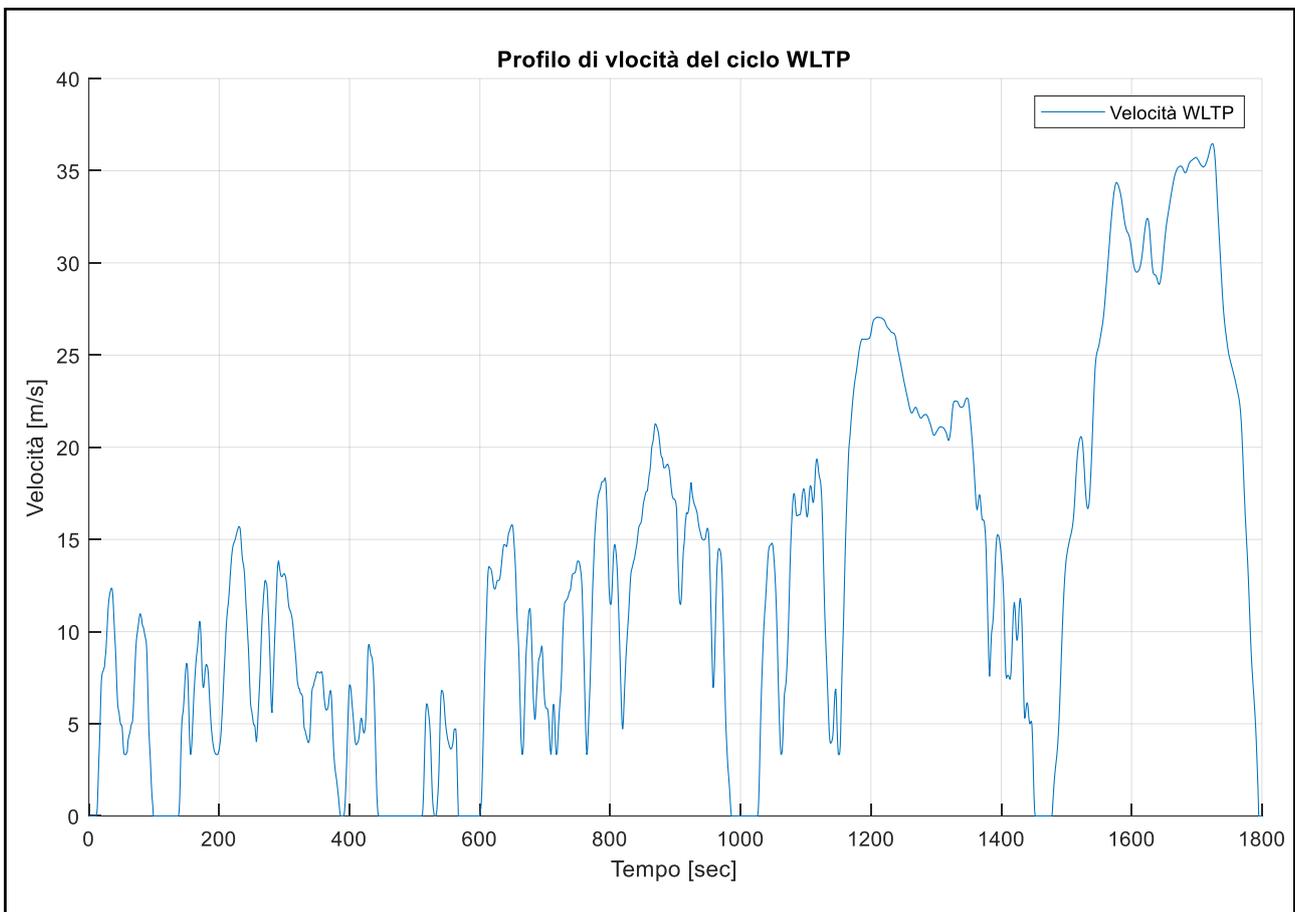


Figura 7 – Profilo di velocità del ciclo WLTP

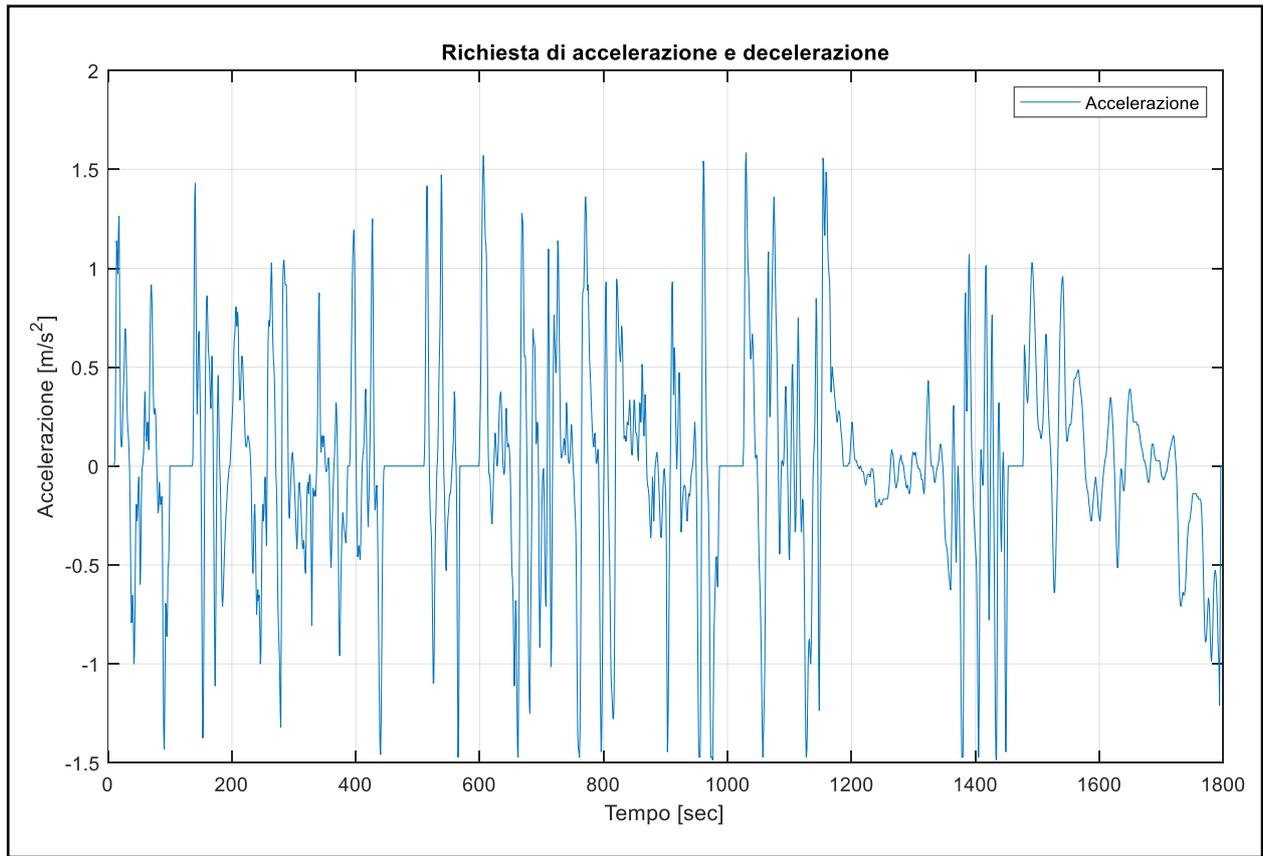


Figura 8 – Profilo di accelerazione del ciclo WLTP

4.4 – Longitudinal Driver

Il secondo blockset che si incontra è denominato Longitudinal Driver, rappresentato in Figura 9, analizza due valori di velocità come input, rispettivamente la velocità definita dal ciclo WLTP e la velocità di feedback simulata, per dedurre l'andamento nel tempo dell'inclinazione dei pedali di acceleratore e freno, assieme ad altre variabili che vengono raggruppate in un insieme di informazioni, successivamente utilizzate.

I dati di input riguardano la velocità di riferimento che la vettura è tenuta a mantenere durante l'esecuzione della prova WLTP, mentre la seconda velocità riguarda quella di feedback, ovvero la velocità che effettivamente viene mantenuta dal veicolo in quell'istante di tempo, e che deve essere confrontata con la prima per poter determinare se il veicolo stia viaggiando come previsto dalla normativa, o se sia necessario modificarne l'andamento, accelerando o decelerando.

Oltre a questi due dati di input, visibili anche in Figura 9, ve ne sono altri, che sono interni al blockset Longitudinal Driver Model, che devono essere inseriti manualmente, quali:

- Massa del veicolo espressa in kg;
- Forza di trazione effettiva del veicolo,
- Il ritardo della risposta del guidatore, ovvero il ritardo in termini di tempo (second), che si ha tra il momento della percezione di un segnale della strada da parte del guidatore, l'elaborazione della risposta del guidatore e la successiva messa in pratica (sterzata, frenata o altro), in risposta all'evento;
- La distanza di previsione, ovvero la distanza dalla quale si inizia ad eseguire un certo comando (ad esempio di frenata assistita o simili);
- Coefficiente di attrito di rotolamento;
- Coefficiente di attrito di rotolamento e di trasmissione;
- Coefficiente di attrito aerodinamico;
- La costante gravitazionale g ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Un ulteriore parametro che potrebbe essere analizzato è il cambio dei rapporti del veicolo, ma dato che si tratta di un veicolo a trazione elettrica, questo dato risulta ininfluente dato che non si sono rapporti di trasmissione come per una macchina tradizionale con cambio.

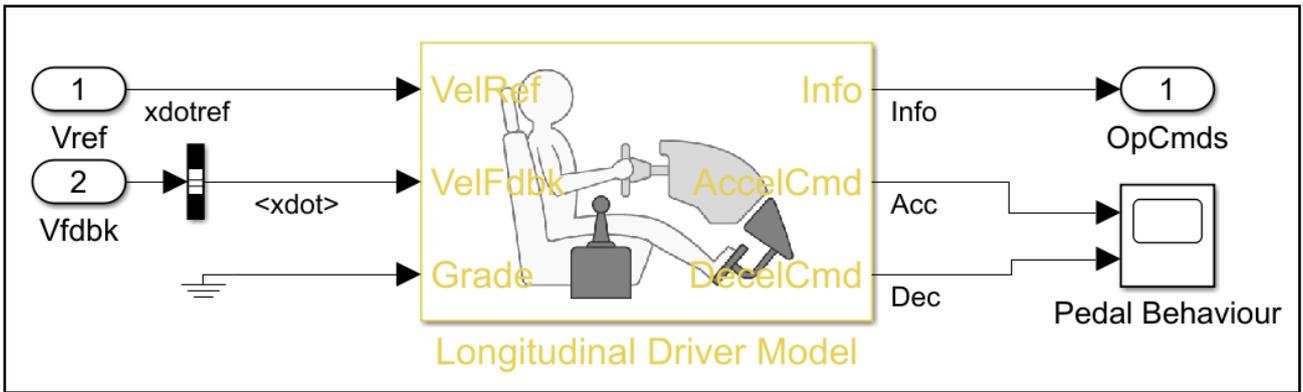


Figura 9 – Blockset Longitudinal Driver

Come già accennato, dall'analisi delle velocità si possono dedurre le fasi di accelerazione e di frenata del veicolo, rappresentate in Figura 10 con due curve differenti: la prima curva (blu) raffigura gli intervalli di tempo in cui la vettura sta accelerando, mentre la seconda curva (rossa) indica gli intervalli di tempo in cui la vettura sta decelerando, il tutto lungo un intero ciclo WLTP. Entrambe le curve non sono mai negative, dato che si tratta di due funzioni che esprimono la percentuale rispetto al fondo corsa che assume un pedale.

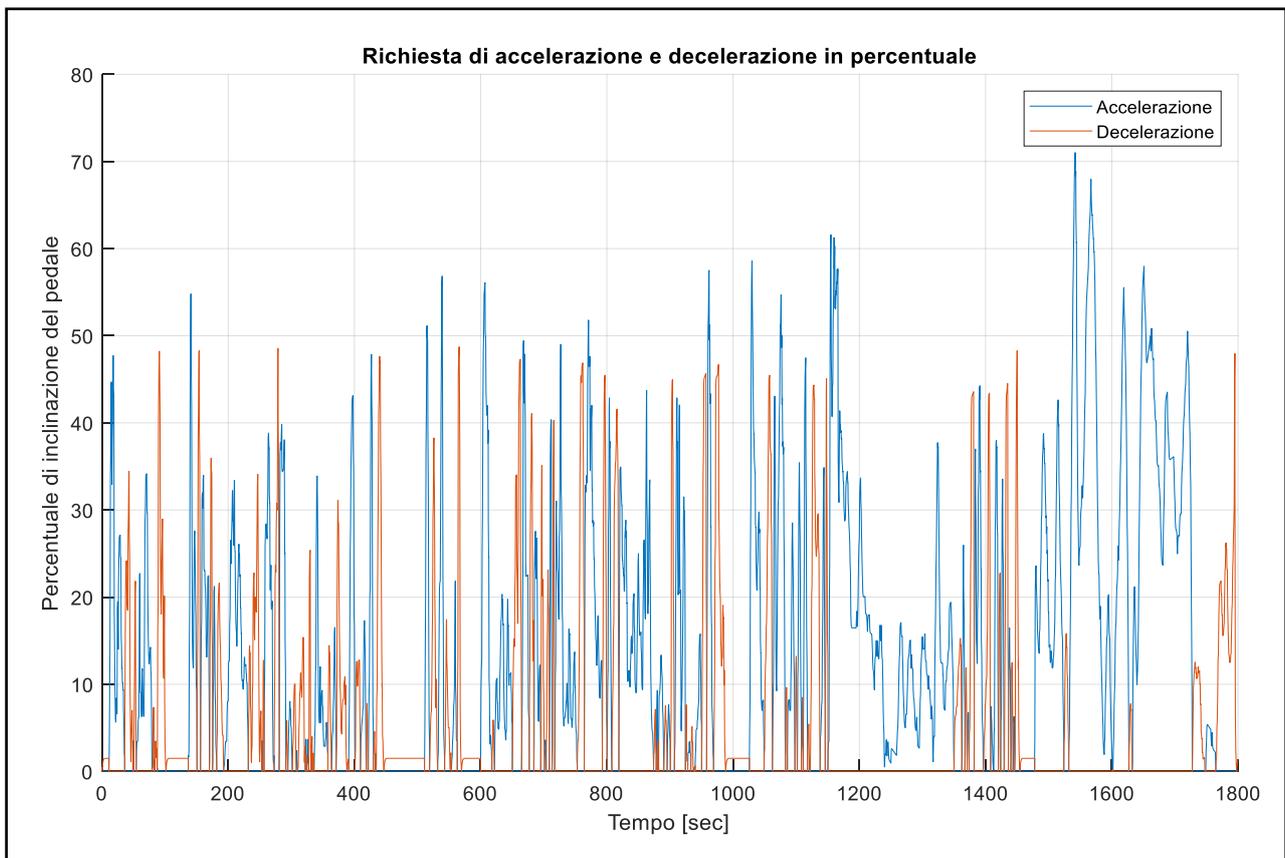


Figura 10 – Percentuale di inclinazione dei pedali di acceleratore e freno

4.5 – Blockset Controllers

4.5.1 – Struttura del blockset controllers

Il blockset Controllers mostrato in Figura 6, si occupa della gestione dei flussi logici di comando, definendo le strategie necessarie per la rigenerazione dello state of charge del veicolo mediante la frenata rigenerativa. Questo processo prevede l'elaborazione dei dati derivanti dai blockset Longitudinal Driver, Controllers, Environment, e Passenger Car, i quali sono collegati tra di loro, in modo da formare un loop iterativo. Quest'ultimo consente di acquisire dati in ingresso di riferimento, confrontarli con quelli elaborati dagli altri blockset, e ripetere questo processo sino alla scarica completa della batteria, in modo da analizzare istante per istante cosa accade al veicolo.

Nello specifico, il blockset Controllers preleva i dati di accelerazione e decelerazione dal blockset Longitudinal Driver, mentre preleva dal blockset Passenger Car le informazioni riguardanti la velocità di feedback del veicolo, lo state of charge della batteria e la velocità di rotazione del motore, per poi elaborarli in blockset minori come mostrato in Figura 11.

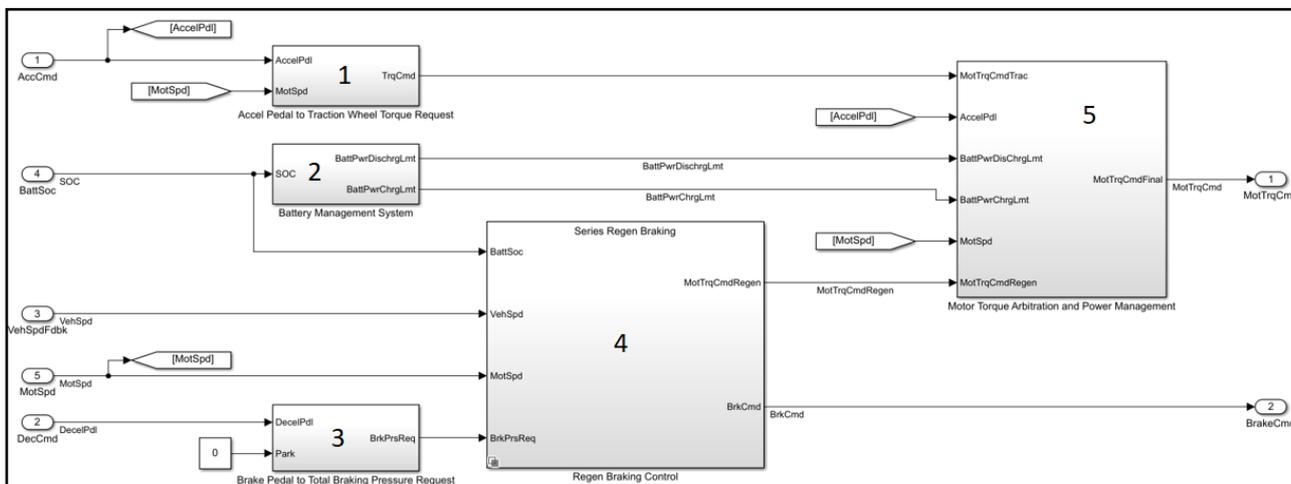


Figura 11 - Blockset Controllers

Analizzando nel dettaglio i singoli blockset in cui il viene scomposto il blockset Controllers, si osserva che il blockset 1 in alto a sinistra, combina il segnale dell'accelerazione definito dalla posizione del pedale con la velocità di rotazione del motore per generare la coppia richiesta al motore. Il blockset 2 rappresenta il BMS (Battery Management System), legge come input il valore dello SOC della batteria, assieme a due valori numerici definiti dal costruttore del veicolo (o dal programmatore), per identificare i limiti di carica e scarica della batteria stessa.

Il blockset 3 in basso a sinistra converte l'informazione relativa alla pendenza del pedale del freno, in pressione agente sui freni, necessaria per decelerare.

Il blockset 5 blockset situato a destra contiene gli algoritmi e la logica per la gestione della coppia e della potenza rigeneratrice, che andrà ad incrementare lo SOC. Infatti, da questo blockset esce un a variabile che viene considerata come dato di input nel blockset Electric Plant, dal quale viene calcolata la corrente recuperata attraverso la frenata rigenerativa, dalla quale dipende l'andamento dello state of charge, e l'autonomia totale del veicolo.

4.5.1 – Regenerative Braking Control

Il blockset centrale (Regenerative Braking Control) la cui logica è rappresentata in Figura 12, definisce la logica con la quale viene effettuata la frenata rigenerativa, aumentando lo state of charge della batteria. Esso riceve come dati di input la velocità del veicolo, la velocità di rotazione del motore espressa in radianti al secondo, la pressione richiesta sui freni per decelerare, e la carica residua della batteria, e li elabora attraverso le logiche in esso implementate, per determinare due parametri di output, quali la coppia massima estraibile dalla vettura per ricaricare la batteria del veicolo, e la richiesta di frenata effettuata dal conducente tramite il pedale del freno.

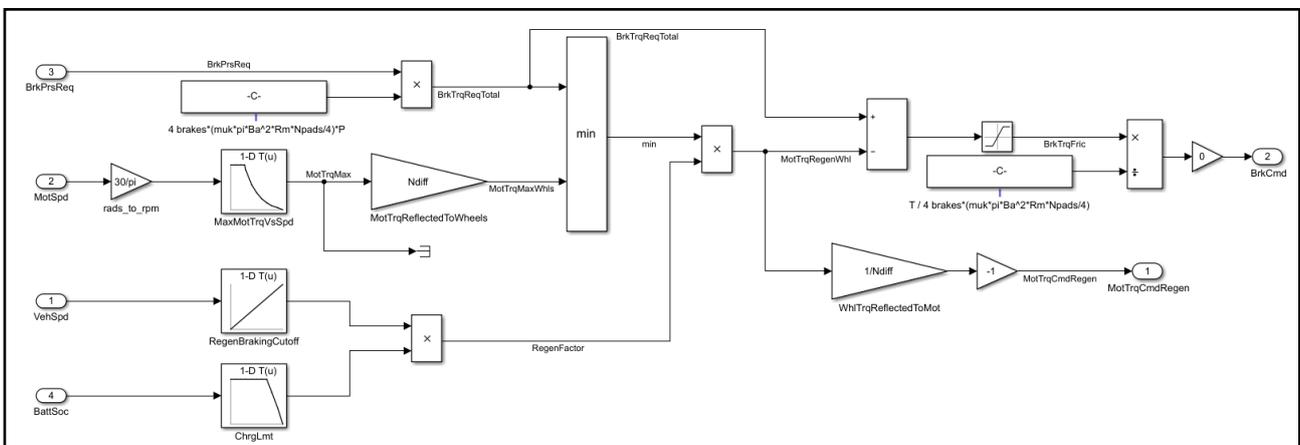


Figura 12 – Blockset Regenerative Braking Control

Con la logica qui implementata, a fronte di una richiesta di decelerazione da parte del conducente, viene in primo luogo fornita alla massima coppia rigeneratrice possibile, e se questa non dovesse essere sufficiente, verrebbe attivata anche la frenata tradizionale dissipativa, fino al raggiungimento della decelerazione richiesta dal conducente, in modo da seguire fedelmente il profilo di velocità del ciclo WLTP.

Si ricorda però che attraverso la richiesta di una decelerazione per mezzo del pedale del freno, si va incontro ad una dissipazione di energia che non potrà quindi essere recuperata per incrementare lo state of charge della batteria (e di conseguenza l'autonomia del veicolo).

4.6 – Environment

Il blockset Environment, presente nella schermata principale del modello Simulink, contiene informazioni riguardanti l'ambiente esterno, come la pressione, la temperatura, ed altri parametri secondari, e si collega direttamente con il blockset Passenger Car che analizza il comportamento della vettura e della batteria del veicolo. Nello specifico, tutti i parametri che esso descrive sono rappresentati in Figura 13, di seguito riportata.

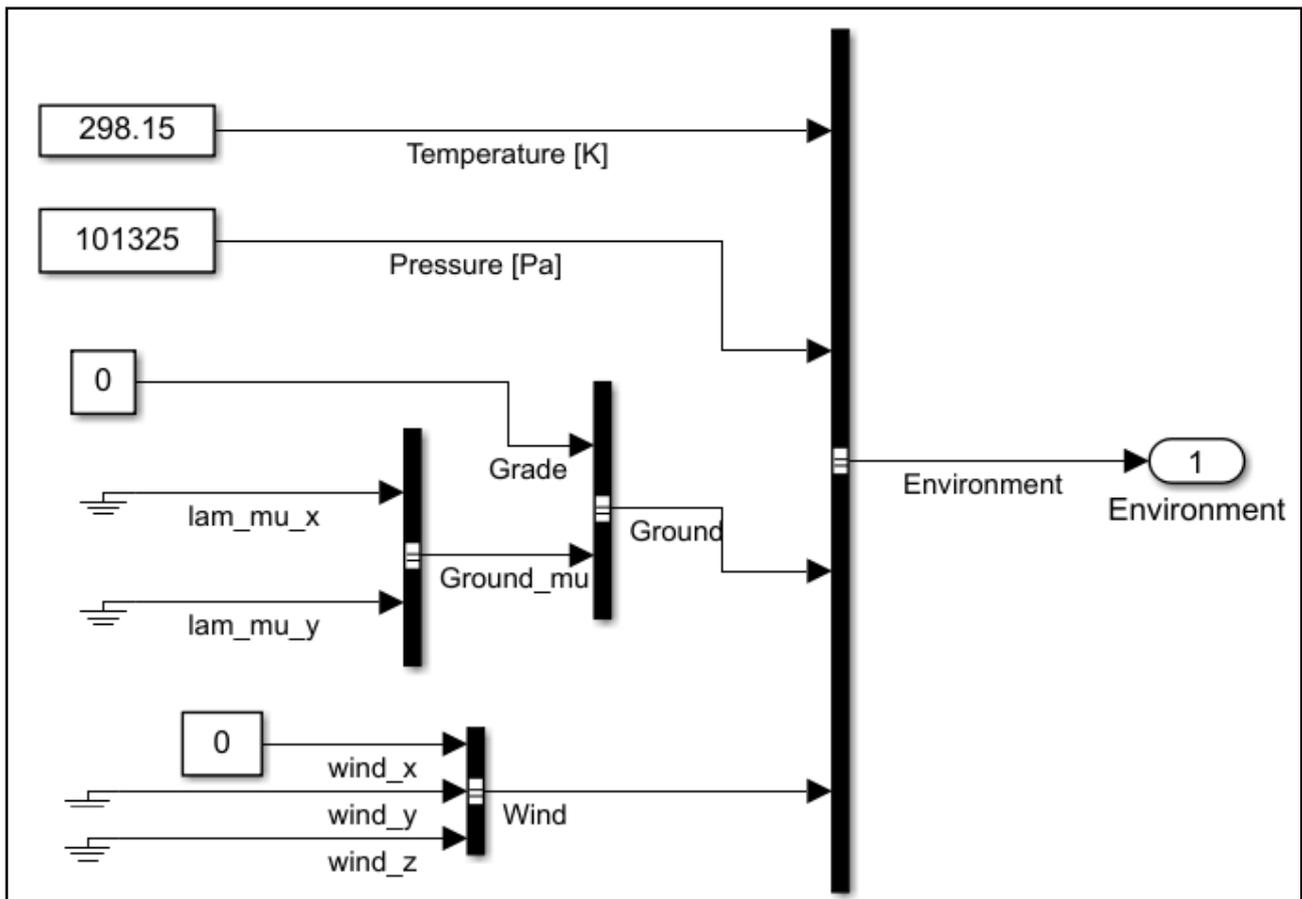


Figura 13 - Blockset Environment

La temperatura è stata definita pari a 25 °C, che corrispondono a 298.15 K, mentre la pressione è stata definita pari a 1 bar, che corrisponde a 101325 Pascal. Scendendo verso il basso, il primo valore pari a zero che si incontra definisce la pendenza della strada, mentre il secondo zero definisce la velocità dell'aria (espressa in m/s) in direzione opposta al moto della vettura, che andrà ad influire sull'attrito aerodinamico che il veicolo dovrà vincere, causando quindi perdite energetiche, e che per semplicità viene impostata inizialmente con valore nullo.

4.7 – Passenger Car

Il blockset Passenger Car si compone di due sotto blocchi, uno relativo alla gestione della batteria, ovvero il blockset Electric Plant, ed il secondo relativo all'analisi della trasmissione del moto del veicolo e della sua dinamica in generale, attraverso il blockset Drivetrain. Nello specifico, il primo serve ad elaborare segnali di natura elettrica quali lo state of charge, la tensione e la corrente di lavoro della batteria e le varie potenze in gioco (dissipate, utilizzate ed immagazzinate per la rigenerazione), mentre il secondo blockset serve ad elaborare feedback meccanici, relativi in particolare alla velocità del veicolo ed alla velocità di rotazione del motore espressa in rotazioni per minuto (RPM). I segnali di feedback così generati, verranno collegati ai blockset quali il Controller o il Longitudinal Driver, in maniera da creare un loop che consenta alla centralina di comando del veicolo di modificare opportunamente i valori accelerazione e decelerazione, al fine di mantenere il profilo di velocità definito dal ciclo WLTP.

4.7.1 – Electric Plant

Il blockset Electric Plant ha il compito di simulare il comportamento della batteria del veicolo e del motore elettrico della vettura, acquisendo come dati di input tre parametri: la coppia motrice erogata dal motore, la velocità di rotazione del motore espressa in RPM, e le condizioni ambiente della batteria, quest'ultime definite dal blockset Environment, come mostrato in Figura 14.

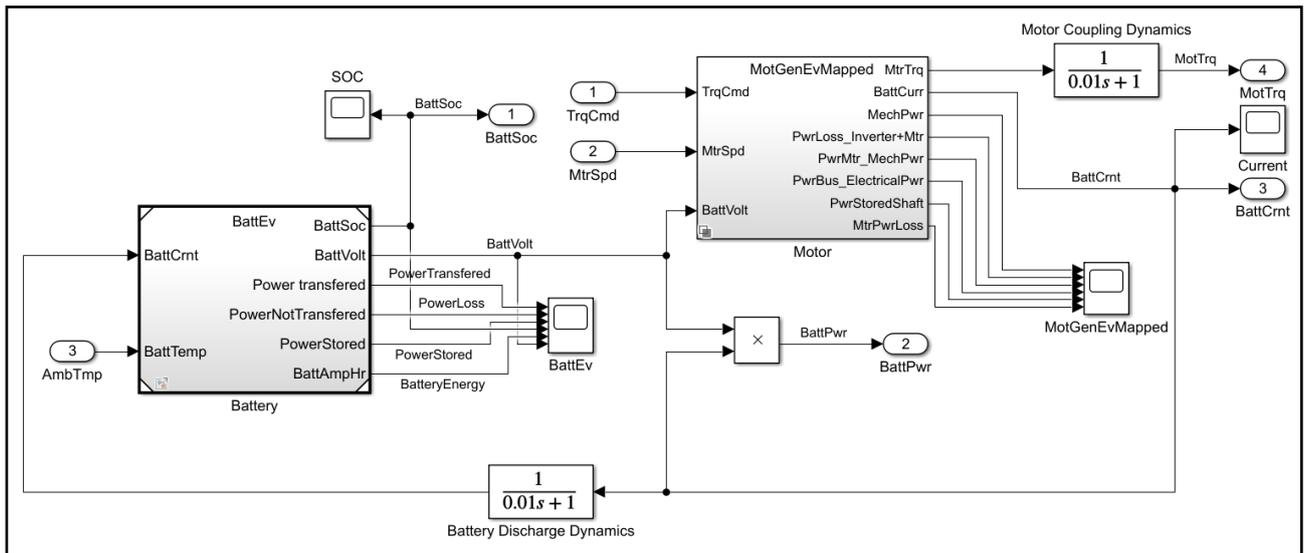


Figura 14 – Blockset Electric Plant

A sua volta l'Electric Plant è suddiviso in due sotto blocchi: il primo (rappresentato a sinistra nella Figura 14) contiene al suo interno tutte le informazioni relative alla batteria del veicolo, ovvero il Datasheet Battery, mentre il secondo blockset (presente nella sezione di destra della Figura 14) contiene tutti gli algoritmi e le logiche che determinano il comportamento del motore del veicolo e dal quale si possono ricavare le grandezze di nostro interesse, quali le potenze in gioco (persa, trasferita e immagazzinata), la corrente che circola nel circuito, e le grandezze di feedback della velocità di rotazione del motore e della coppia che esso applica per l'avanzamento della vettura.

4.7.2 – Datasheet Battery

Il blockset Datasheet Battery rappresentato in Figura 15, permette di studiare cosa accade alla batteria della vettura, che nello specifico è una batteria agli ioni di litio, con la possibilità di parametrizzarla attraverso i dati forniti dalla casa madre, o reperiti online, quali la capacità massima espressa in Ampere*ora [Ah], la capacità iniziale della batteria del veicolo, il numero di celle in serie ed in parallelo che formano l'intero pacco batteria, e altri parametri secondari. Per poter effettuare delle prove quanto più simili tra di loro, in modo da poter effettuare un confronto, sono stati definiti i parametri relativi al numero di celle in serie, pari a 96, che nella maggior parte dei casi non è variato significativamente, mentre il numero di celle in parallelo è variabile, a seconda degli altri parametri che vengono dichiarati dalla case costruttrici, al fine di far combaciare tali specifiche mediante un controllo tra i valori dichiarati e quelli calcolati manualmente per conferma. I dati di input che richiede questo blockset, oltre a quelli appena citati, riguardano la corrente che attraversa il pacco batteria, espressa in Ampere [A] e la temperatura della batteria, espressa in gradi Kelvin [K], le resistenze interne [Ohm] oltre ad una serie di parametri che caratterizzano l'impianto batteria stesso. I dati di output che elabora il blockset riguardano la tensione della batteria espressa in volt [V], la corrente che scorre nella rete della batteria espressa in Ampere [A], la capacità della batteria [Ah], lo state of charge (SOC) che esprime la carica residua della batteria, e le potenze della batteria distinte tra immagazzinate, perse, e trasferite attraverso la rete, tutte espresse in Watt [W]. Nello specifico, per determinare la tensione della batteria, si utilizzano delle lookup table, in funzione dello state of charge e della temperatura della batteria, descrivendo così il comportamento della batteria stessa, per diversi punti di lavoro.

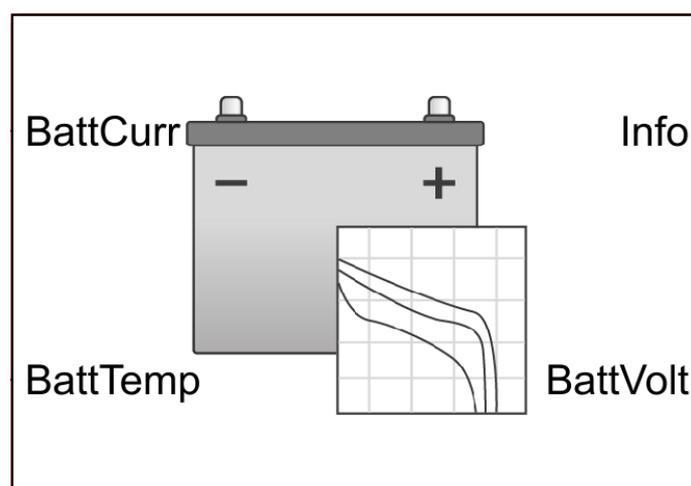


Figura 15 - Datasheet Battery

4.7.3 – Analisi delle potenze

I risultati derivanti dall'analisi di questo blockset vengono mostrati in Figura 16, in cui si riportano gli andamenti delle potenze in gioco, della corrente che attraversa il pacco batteria, e della tensione alla quale lavora.

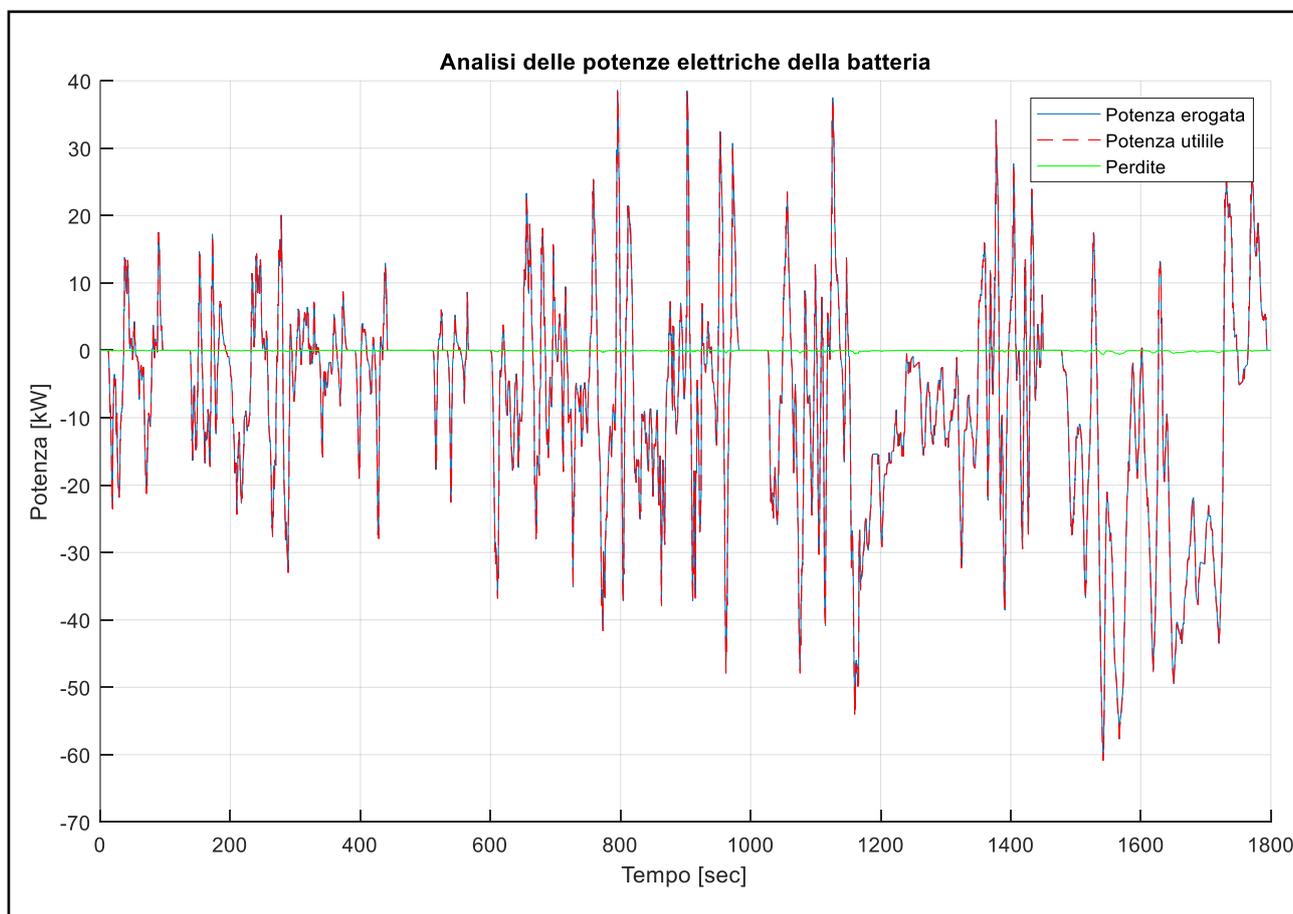


Figura 16 – Analisi delle potenze

In particolare, si evidenzia come l'andamento della potenza erogata dalla batteria, rappresentata dalla curva blu, è dato dalla somma delle altre due curve di potenza persa, ovvero le perdite, rappresentate dalla curva verde, e della curva della potenza utile, rappresentata dalla curva rossa. Infatti, fisicamente, la potenza totale che la batteria fornisce al veicolo è caratterizzata da una parte che viene effettivamente utilizzata per la movimentazione della vettura (la maggior parte), e da una seconda parte (quasi trascurabile in confronto alla prima) che viene dissipata sotto forma perdite, lungo la rete. La curva blu, indica la potenza che la batteria eroga nelle fasi di accelerazione, è negativa dato che la potenza uscente dalla batteria viene considerata per convenzione con segno negativo, ed è

data dalla sommatoria della potenza utile e dalla potenza persa (perdite), come riportata nelle seguenti espressioni:

$$P_{erogata} = P_{utile} + P_{persa} = -V_{utile}I_{utile} - N_p N_s I_{utile}^2 R_{int}$$

$$P_{utile} = -V_{utile}I_{utile}$$

$$P_{persa} = -N_p N_s I_{utile}^2 R_{int}$$

Da queste espressioni si intuisce che per una componente positiva della corrente si ottiene un valore negativo di tutte e tre le potenze, con diminuzione dello state of charge, dato il segno positivo della corrente corrisponde ad una erogazione di corrente e di potenza. Solo per una frazione ridotta di tempo la curva dell'energia si presenta come una curva positiva, a causa dell'aumento dello state of charge, dovuto all'effetto della frenata rigenerativa, che restituisce una quantità di potenza alla batteria (seppur piccola), per incrementare l'autonomia del veicolo. Si riporta di seguito in Figura 17, un dettaglio dell'analisi delle potenze, per comprendere meglio le equazioni appena scritte, nonché il comportamento delle stesse: si nota infatti come la potenza erogata sia sempre ottenuta dalla somma tra la potenza utile e le perdite, anche se queste ultime valgono solo pochi punti percentuale rispetto alle altre due.

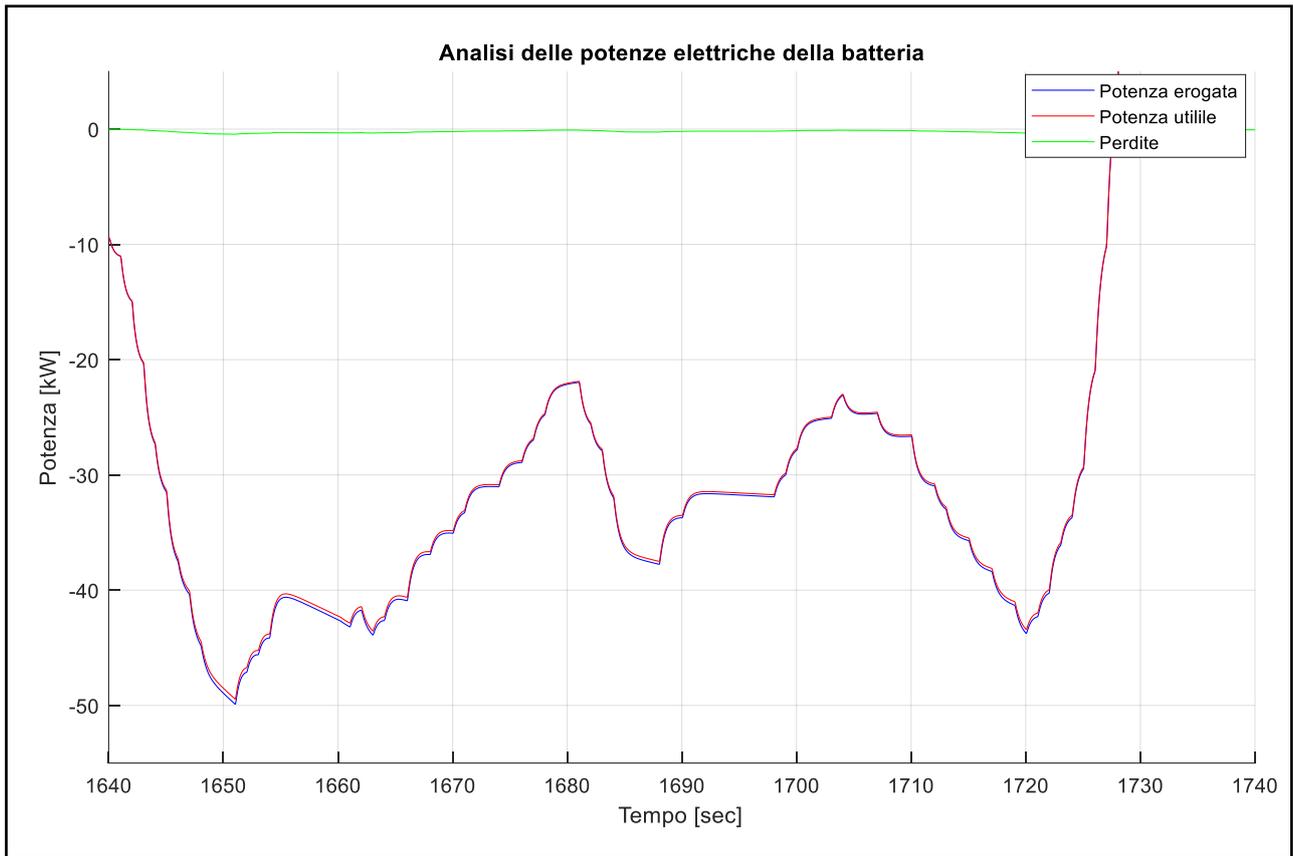


Figura 17 – Dettaglio dell'analisi delle potenze

4.7.4 – Analisi della tensione della batteria

Di seguito in Figura 18, viene mostrato l'andamento della tensione alla quale lavora la batteria. Dall'analisi del profilo che descrive il suo andamento nel tempo, se si prende in considerazione la curva che descrive il suo andamento medio, si intuisce come essa decresca progressivamente,

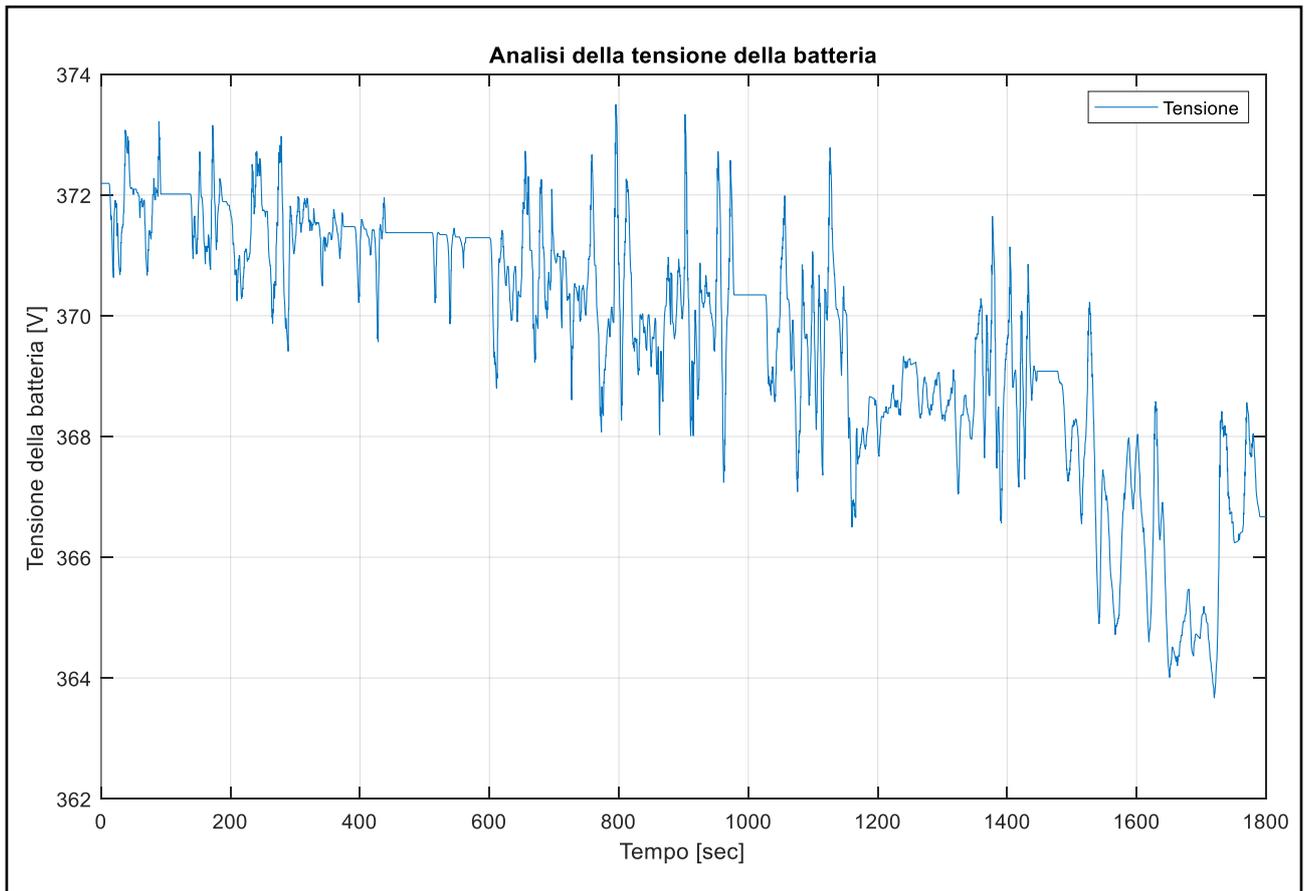


Figura 18 - Andamento della tensione

4.7.5 – Analisi della corrente

Di seguito in Figura 19, viene rappresentato l'andamento della corrente erogata dalla batteria, con valori per la maggior parte positivi, ad eccezione di piccoli intervalli di tempo, in cui entra in azione la frenata rigenerativa, permettendo al veicolo di recuperare energia, confermato dai tratti in cui il modulo della corrente è minore di zero. Questo perché la logica del blockset prevede un decremento dello state of charge nei tratti in cui la corrente è positiva, ovvero la corrente viene erogata dalla batteria del veicolo per alimentarlo, mentre nei tratti in cui la corrente assume dei valori negativi, la logica del blockset indica che sta avvenendo la ricarica della batteria, come conseguenza della frenata rigenerativa.

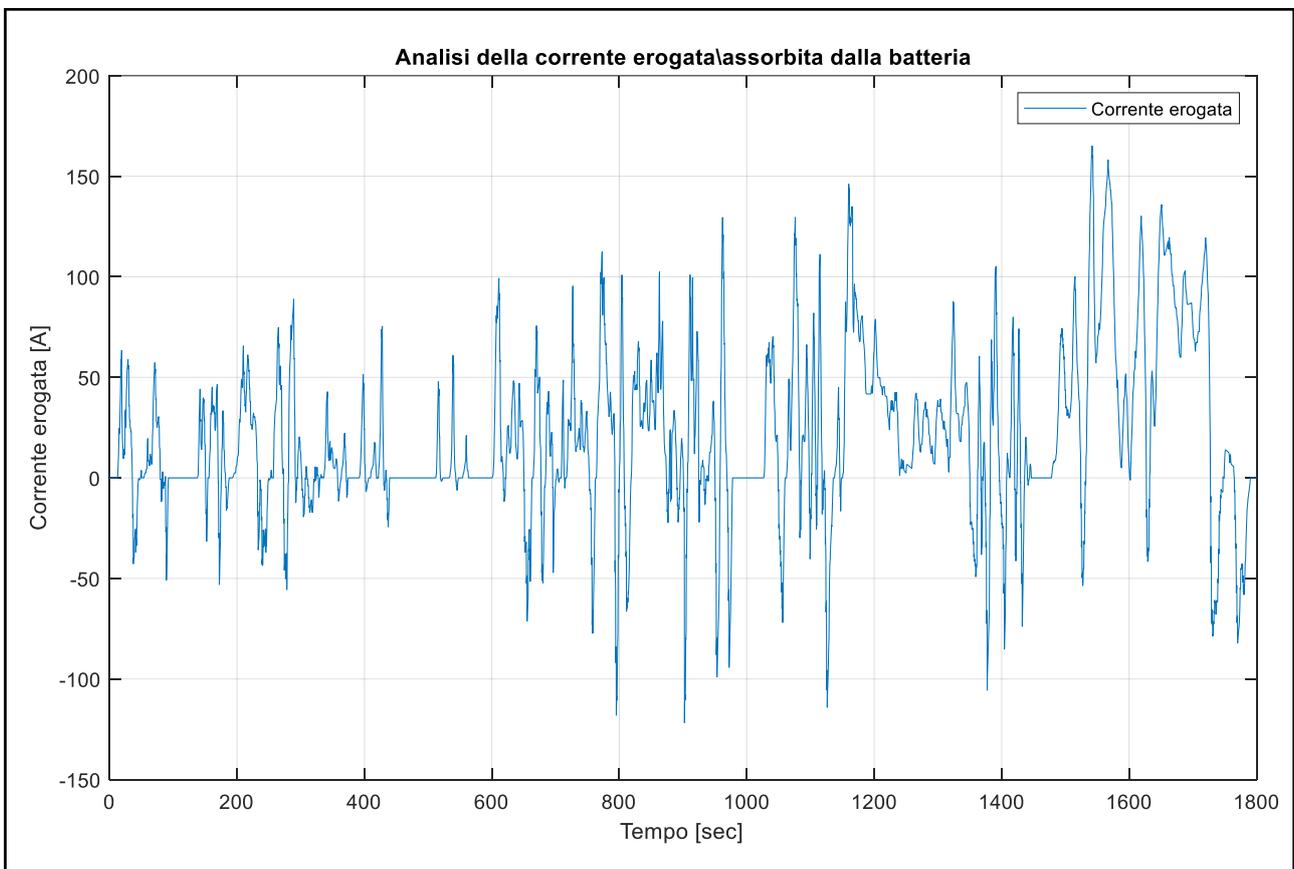


Figura 19 - Andamento della corrente

4.7.6 – Analisi dello State of Charge – SOC

La curva dello state of charge di un ciclo WLTP rappresentata in Figura 20, indica la percentuale di carica residua della batteria, ovvero il livello di autonomia residuo del veicolo, prima che si scarichi completamente. Presenta un andamento generalmente decrescente, ad eccezione di quegli intervalli di tempo in cui la corrente risulta essere negativa, sintomo di ripristino della carica della batteria, attraverso il sistema della frenata rigenerativa.

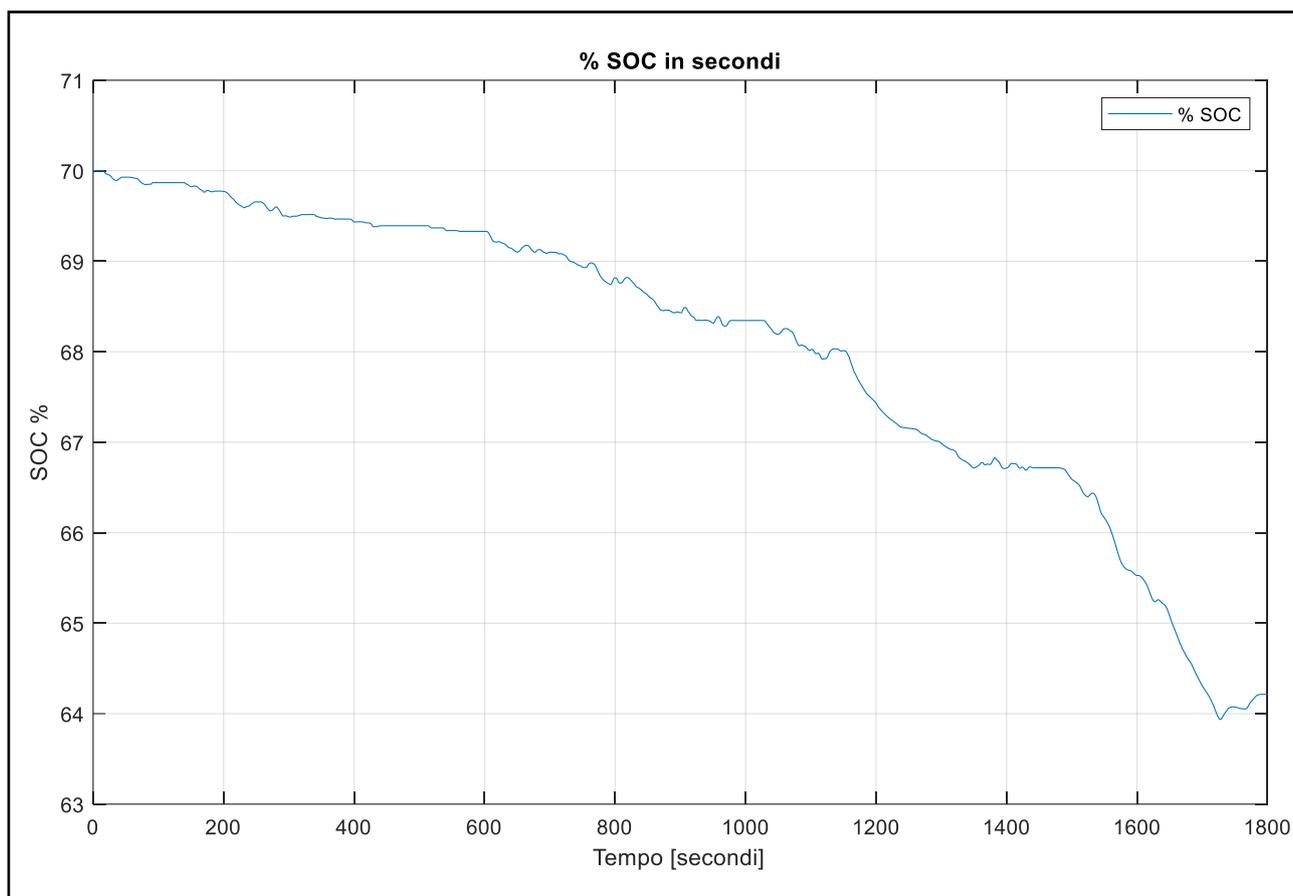


Figura 20 - Andamento dello state of charge (SOC) della batteria

Nello specifico, qui viene mostrato l'andamento dello state of charge per un ciclo WLTP, con una condizione iniziale del livello di carica pari al 70% della carica massima, con la frenata rigenerativa attiva, ma senza la logica dell'e-Pedal implementata, con una diminuzione della carica residua a fine ciclo pari al 5,79%.

In particolare, il comportamento dello state of charge appena mostrato, dipende dai valori inseriti nella lookup table mostrata in Tabella 1, la quale elabora un coefficiente di output compreso tra zero e uno, per ogni valore di input dello state of charge.

% SOC	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Coefficiente rigenerativo	1	1	1	1	1	1	1	1	0,7	0,35	0

Tabella 1 – Lookup table relativa allo state of charge

I coefficienti rigenerativi indicano l'efficacia di rigenerazione in fase di decelerazione, ed evidenziano una rigenerazione massima fino al 70% della carica residua, mentre diminuiscono progressivamente fino al raggiungimento del livello massimo di carica pari al 100%, in cui la rigenerazione è nulla. Si riporta a titolo di esempio un ulteriore andamento dello state of charge per un ciclo WLTP, in cui a differenza del caso appena mostrato, la percentuale di state of charge iniziale è massima e pari al 100%.

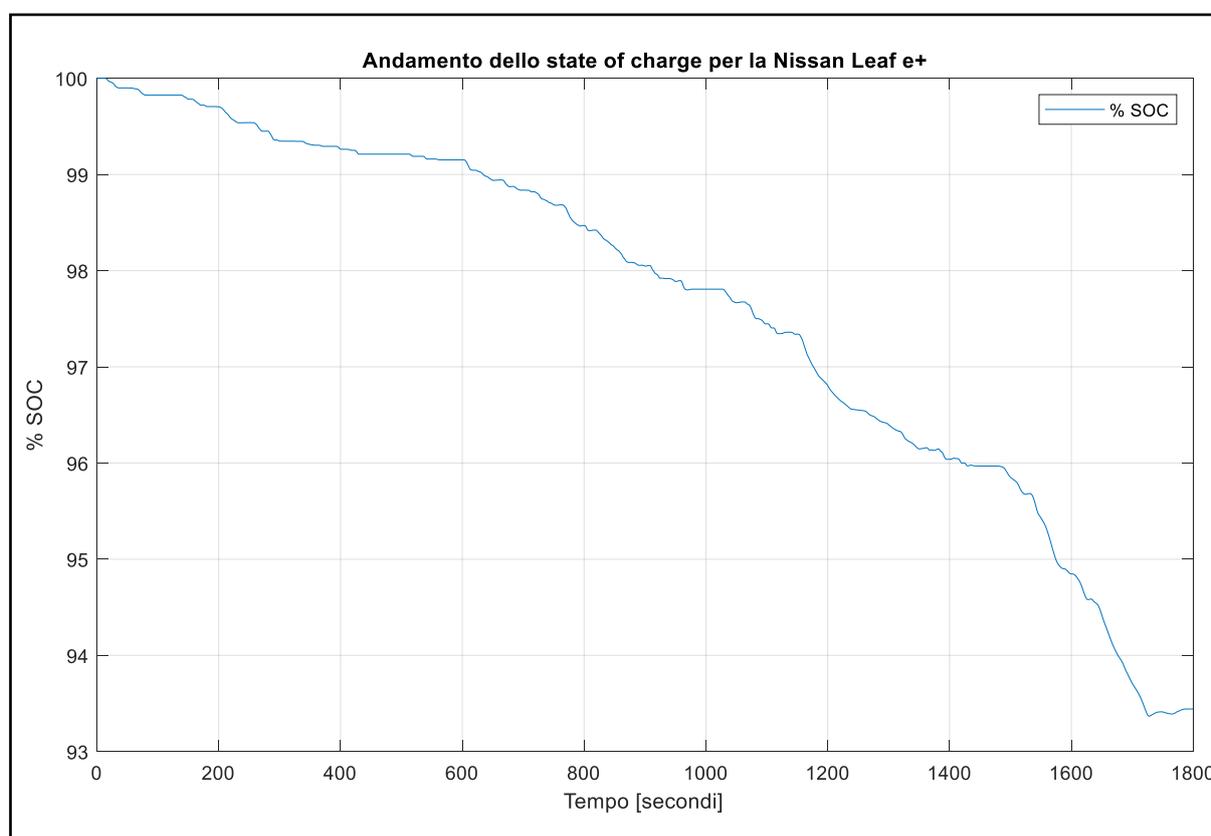


Figura 21 – Andamento dello state of charge con carica iniziale massima

Come si evince dalla Figura 21, se la percentuale iniziale dello state of charge è prossima a quella massima, non si ha un ripristino della carica in fase di decelerazione (di frenata), infatti dopo un intero ciclo WLTP, la diminuzione dello state of charge è pari al 6,56%, a differenza di una diminuzione pari al 5,79% nel caso precedente con carica iniziale pari al 70%.

4.7.7 – Mapped motor

Il secondo blocco fondamentale della sezione Electric Plant, è rappresentato dal blockset Mapped Motor, visibile in Figura 22, che implementa la logica di un motore elettrico, con tutti gli algoritmi relativi alla componentistica elettronica del modello reale, generando un sistema di controllo della coppia.

Esso richiede come parametri di input la tensione della batteria espressa in volt (fornita dal blockset Datasheet Battery appena presentato), la velocità di rotazione del motore elettrico espressa in radianti al second, e la coppia motrice richiesta dall'utilizzatore, espressa in Newton*metro.

Le informazioni che fornisce in uscita questo blockset riguardano le potenze in gioco espresse in watt, la quantità di corrente in ingresso o in uscita dalla batteria del veicolo espressa in Ampere, e la coppia che viene fornita dal motore espressa in Newton*metro [Nm]. Si precisa che la coppia in uscita tiene traccia della richiesta di coppia da parte del conducente con un ritardo definito da una costante di tempo di risposta del motore e di risposta del convertitore. Il blocco presuppone che le fluttuazioni di velocità dovute al carico meccanico non influiscano sull'inseguimento della coppia del motore.

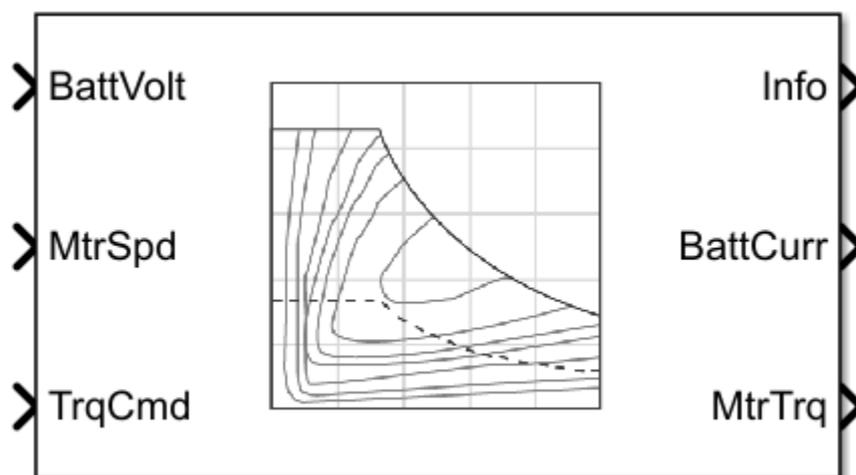


Figura 22 – Blockset Mapped Motor

Nello specifico, gli andamenti delle potenze sono stati appena trattati e non vengono qui ripresentati, così come per l'andamento della corrente, mentre l'andamento della coppia motrice viene esposto in Figura 23.

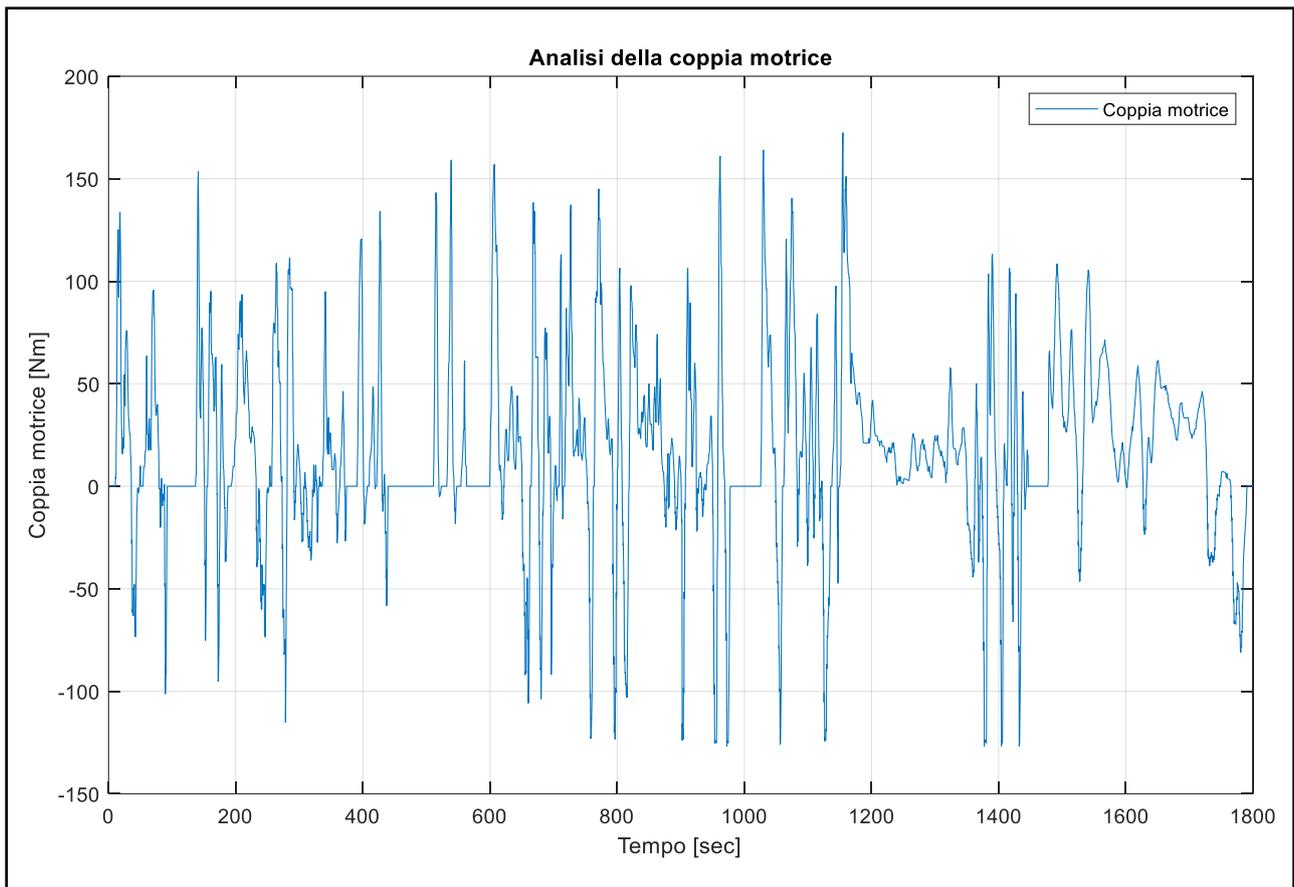


Figura 23 – Coppia motrice o coppia rigeneratrice

L'andamento della coppia motrice richiama inoltre l'andamento della corrente erogata nel tempo, presente in Figura 19. Hanno infatti lo stesso andamento, ad eccezione dei valori in modulo, dato che alla richiesta di coppia motrice il sistema deve iniziare ad erogare corrente, mentre negli intervalli di tempo in cui il modulo della coppia risulta negativo, ovvero quando si ha una coppia rigeneratrice, la corrente risulta negativa, in accordo con la definizione data precedentemente, secondo cui la corrente negativa implica la rigenerazione dello state of charge della batteria del veicolo.

4.7.8 – Drivetrain

Come detto in precedenza il blockset Passenger Car è composto da due sotto blocchi: il primo è stato appena analizzato nel dettaglio nei paragrafi precedenti, ovvero l'Electric Plant, mentre il secondo è denominato Drivetrain. Quest'ultimo, mostrato in Figura 24, svolge la funzione di analizzare e gestire l'apparato meccanico e dinamico del veicolo, attraverso delle logiche di controllo che prendono in input quattro variabili tra cui la coppia motrice, la richiesta della frenata da parte del guidatore, il grado di pendenza della strada e la velocità del vento che soffia in verso opposto al moto del veicolo, che sono stati già precedentemente definiti nel blockset Environment. Questi input vengono successivamente elaborati e convertiti in valori di output riguardanti la velocità del veicolo e la velocità di rotazione del motore. Questi ultimi due dati poi, vengono convogliati in un bus che li riassume sotto la voce Velocità di Feedback del veicolo, che verrà in seguito reimmessa nel loop del modello o visualizzato a schermo tramite apposite funzioni.

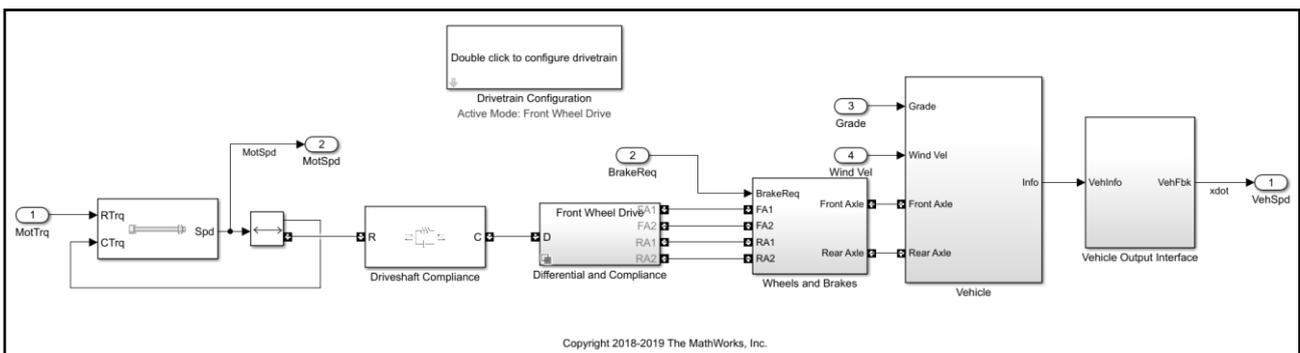


Figura 24 – Drivetrain Blockset

Nello specifico, i sotto blocchi che verranno modificati saranno rispettivamente il Wheels and Brakes, ed il blockset Vehicle, dato che al loro interno sono contenuti dei parametri che possono essere modificati in base alle caratteristiche del veicolo, andando di conseguenza a modificare lo state of charge e quindi l'autonomia. Diversamente da questi due sottoinsiemi, gli altri non verranno modificati, dato che contengono per lo più delle logiche di analisi e di previsione del comportamento della vettura e dei suoi componenti, pertanto non verranno trattate nel seguito.

4.7.9 – Wheels and brakes

Il primo blockset dell'insieme Drivetrain ad essere analizzato è denominato Wheels and Brakes, rappresentato in Figura 25. Esso contiene due modelli identici tra loro dei dispositivi frenanti installati rispettivamente sull'asse anteriore e posteriore del veicolo, ed ogni ruota presente nell'immagine rappresenta e descrive il comportamento della coppia di ruote sull'asse anteriore o sull'asse posteriore, supponendo una simmetria delle condizioni e delle forze in gioco, in modo da poter effettuare lo stesso ragionamento e le stesse considerazioni anche sulla ruota del lato opposto del veicolo, senza incorrere in errori che comprometterebbero la bontà del modello stesso. Uno dei pochi parametri modificabili è il gain che si trova alla sinistra di ogni ruota, ma che non sono stati modificati, in quanto non è stata come modifica, quindi questo blockset è rimasto inalterato.

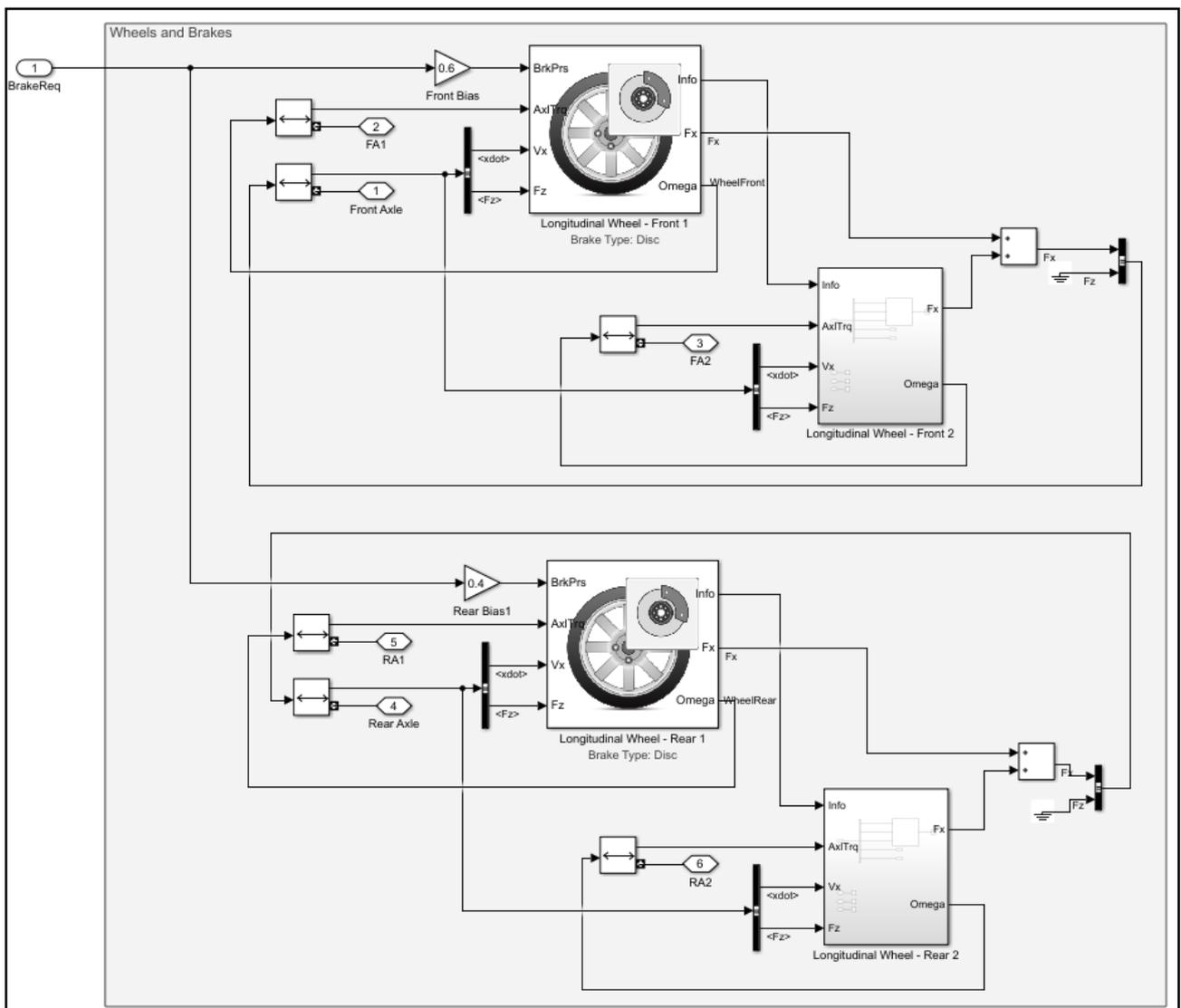


Figura 25 - Blockset Wheels and Brakes

4.7.10 – Vehicle

Il secondo blockset dell'insieme Drivetrain ad essere analizzato è denominato Vehicle, ed è rappresentato in Figura 26. Esso contiene un modello a tre gradi di libertà che simula il comportamento del veicolo e analizza il suo comportamento grazie alla possibilità di implementare i dati che caratterizzano la vettura stessa come la massa, il coefficiente aerodinamico, l'area frontale del veicolo, le condizioni meteorologiche già definite nel blockset Environment, e tanti altri parametri secondari che aiutano a definire ancora di più nel dettaglio la vettura per un'analisi accurata e che rispecchi il più fedelmente possibile le caratteristiche ed il comportamento del veicolo su strada, durante l'esecuzione della prova WLTP prevista dalla normativa.

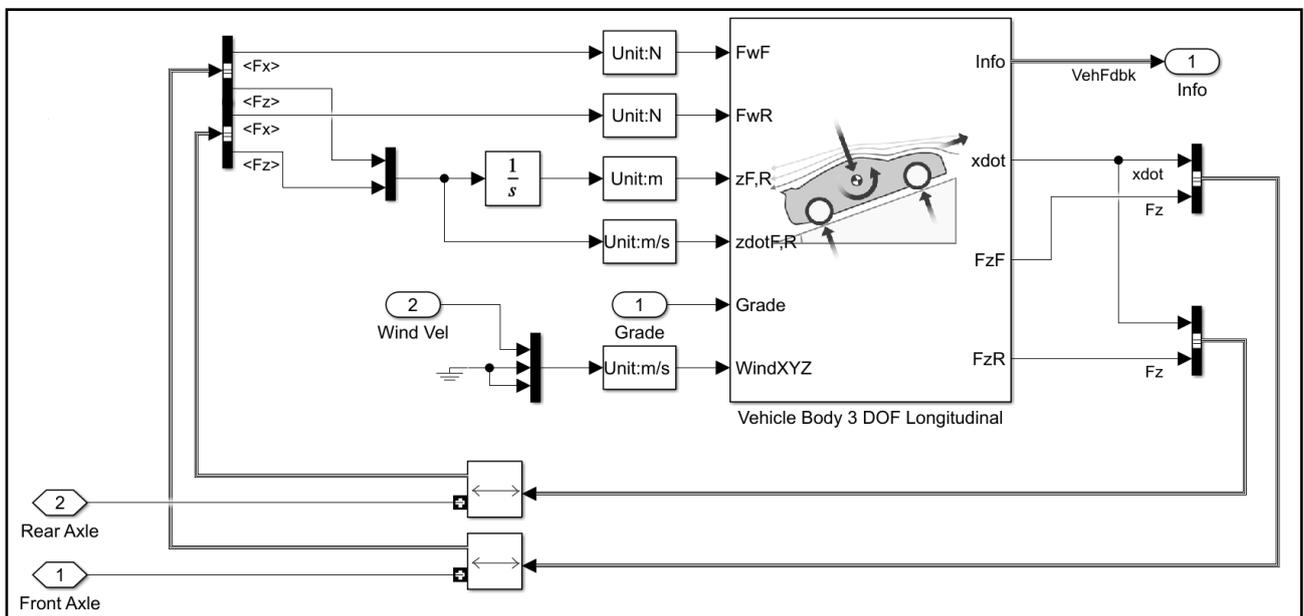


Figura 26 - Blockset Vehicle

Nello specifico, questo blockset assume come valori di input la velocità del vento che soffia con verso opposto alla direzione del moto della vettura, il grado di inclinazione della strada, ed i valori elaborati dal blockset precedente Wheels and Brakes.

4.8 – Visualization

L'ultimo blockset del modello prende il nome di Visualization, mostrato in Figura 27, ed ha la funzione di mostrare tramite una serie di grafici gli andamenti di alcune grandezze fondamentali che sono state analizzate nel corso della descrizione del modello. Ciascuna di queste grandezze viene dapprima convertita nelle le unità di misura del sistema internazionale attraverso degli opportuni coefficienti (se necessario), ed infine vengono rappresentate. Alcuni esempi sono la traccia della velocità del veicolo espressa in km/h, lo state of charge della batteria del veicolo espresso in percentuale, la velocità di rotazione del motore espressa in rpm, l'intensità della corrente che attraversa il circuito espressa in Ampere, la coppia erogata dal motore espressa in N*m, ed il consumo equivalente di combustibile espresso in MPGe (miles per gallon gasoline equivalent).

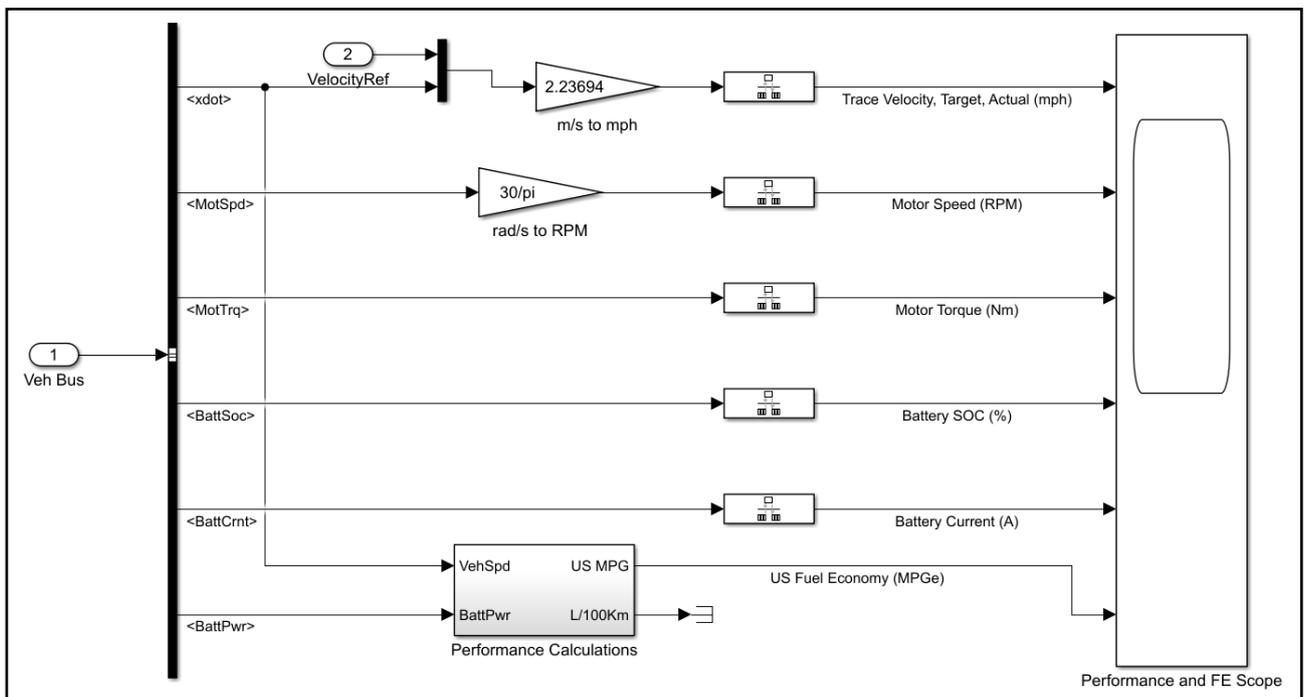


Figura 27 – Blockset Visualization

5 – Validazione modello

5.1 – Introduzione

Prima di procedere con le simulazioni in ambiente Matlab e Simulink per analizzare gli effetti dovuti all'implementazione della logica dell'e-Pedal, si vuole convalidare il modello creato, attraverso delle prove, nelle quali vengono testati i modelli realizzati dalle varie case automobilistiche prese in esame. In questo modo, si otterrà un'affidabilità maggiore riguardo la veridicità dei risultati che si otterranno con le simulazioni future, a meno di un errore che potrà essere considerato trascurabile, o corretto con opportuni accorgimenti, ovvero dei coefficienti correttivi, che verranno spiegati nel seguito. Queste prove di validazione del modello vengono condotte inserendo come valori di input nel modello i valori caratteristici delle vetture prese in esame (reperite sui siti dei vari car maker), quali la massa del veicolo, il coefficiente di attrito aerodinamico (C_x), il livello iniziale dello state of charge del veicolo (SOC), e la capacità della batteria del veicolo (iniziale e totale). Questi dati consentono al modello di simulare l'andamento nel tempo dello state of charge della batteria, secondo il profilo di velocità definito dalla normativa WLTP (descritta in precedenza), fino all'esaurimento della carica della batteria, mediante una ripetizione ciclica ininterrotta dello stesso percorso.

5.2 - Obiettivo

L'obiettivo di queste analisi è calcolare la distanza massima che i diversi veicoli riescono a percorrere, ovvero l'autonomia, e confrontare tali valori con quelli dichiarati dalle case automobilistiche, verificando che siano quanto più simili tra loro. In caso affermativo, si potrà confermare che il modello simula in maniera coerente il comportamento del veicolo elettrico reale, e si potrà quindi procedere con la scrittura e con la successiva implementazione della logica del sistema e-Pedal, per verificare se esso porti dei margini di miglioramento allo state of charge (e quindi all'autonomia) o meno.

5.3 – Parametri del veicolo

Per poter determinare l'autonomia del veicolo, devono essere definiti i parametri relativi alle dimensioni del pacco batteria del veicolo, la natura chimica dello stesso, la capacità iniziale e totale del pacco batteria, ed i parametri fisici del veicolo quali la massa, il coefficiente di attrito aerodinamico e l'area frontale. Per alcuni di essi, quando difficilmente reperibili, sono state effettuate delle ipotesi semplificative, che porteranno ad errori (in ogni caso di lieve entità) a seconda del modello in esame, ma che consentono di adottare la stessa logica per l'analisi dell'autonomia di veicoli diversi.

Nello specifico, i dati relativi al dimensionamento della batteria, quando non reperibili, sono stati valutati tramite delle equazioni matematiche, in maniera tale da riprodurre i parametri della tensione o della capacità della batteria, simili in modulo a quelli noti degli altri veicoli. Per realizzare queste configurazioni, si considera l'intero pacco batteria come un circuito formato da tante celle connesse in serie ed in parallelo, rispettivamente indicate con le variabili N_s e N_p , in modo da formare una griglia, disposta su un unico piano, le cui dimensioni sono dettate dalle variabili relative ai nodi in serie ed in parallelo. La tipologia della batteria utilizzata da tutte le case costruttrici è agli ioni di litio, la cui tensione di funzionamento della singola cella in funzione della scarica della batteria, viene riportata in Figura 28.

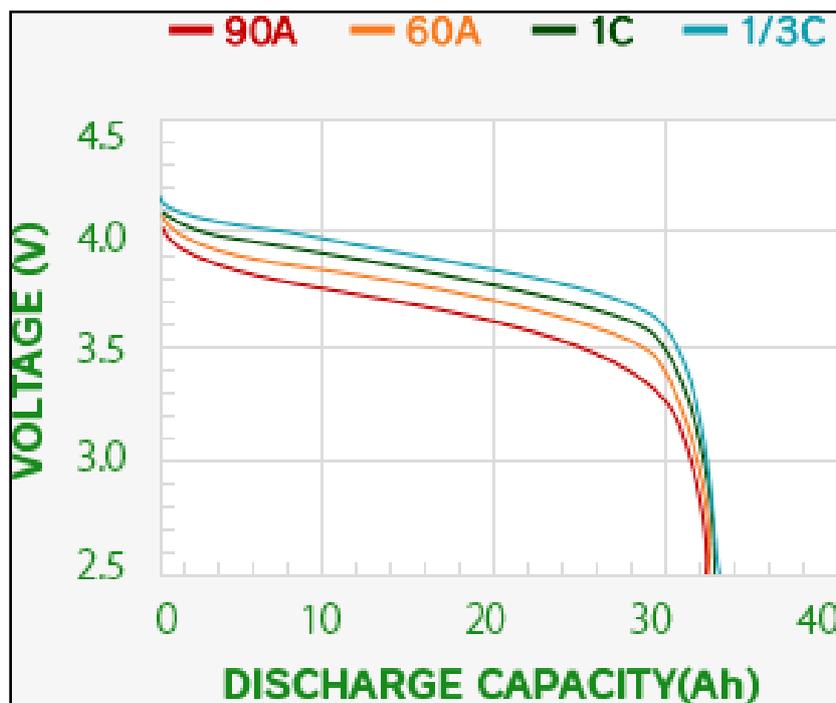


Figura 28 - Caratteristica della batteria agli ioni di litio

5.3.1 – Tensione della batteria

In prima approssimazione si considera l'intero pacco batteria composto da una rete di celle tutte giacenti (idealmente) sullo stesso piano, che formano delle serie e dei paralleli. Da questa prima approssimazione, si valuta la tensione totale come prodotto tra il numero di celle in serie N_s e la tensione stimata della singola cella V_{cella} , pari a circa 3,75 V, come riportato dalla seguente relazione:

$$Tensione\ totale\ batteria = N_s * V_{cella}$$

Da questo primo confronto, in cui è nota in partenza la tensione totale della batteria, si deduce il numero di celle in serie (N_s) di cui deve essere composto l'impianto batteria.

Modello veicolo	Tipo Batteria	N_s	Tensione cella [V]	Tensione calcolata[V]	Tensione dichiarata [V]
Nissan Leaf	Ioni di litio	96	3,75	360	360
Nissan Leaf e+	Ioni di litio	96	3,75	360	360
Renault Twingo	Ioni di litio	96	3,65	350,4	360
Renault Zoe	Ioni di litio	96	3,65	350,4	360
Opel Mokka	Ioni di litio	108	3,70	399,97	400
Opel Corsa	Ioni di litio	96	4,17	399,98	400
Peugeot 208	Ioni di litio	96	4,17	399,98	400
Fiat 500e	Ioni di litio	96	3,79	363,98	364
BMW i3	Ioni di litio	96	3,67	352,03	352
Smart For 2	Ioni di litio	96	3,75	360	?
Tesla Model S	Ioni di litio	96	3,33	320,02	320
Audi e-tron	Ioni di litio	108	3,67	395,98	396
Xev YOYO	Ioni di litio	18	4	72	72

Tabella 2 - Analisi della tensione della batteria

Come si evince dai dati riportati in Tabella 2, sotto la voce tensione di cella, non sono presenti dei valori fissi, in quanto possono variare in funzione degli altri parametri che caratterizzano l'impianto batteria della vettura, o delle condizioni di funzionamento in cui si trova. Nello specifico, laddove è definita a priori la tensione dichiarata perché presente online o in letteratura, si effettua un controllo tramite il ricalcolo della tensione totale (definita in Tabella 2 come tensione calcolata) per verificare la bontà dei valori relativi al numero di celle in serie (N_s) e della tensione di singola cella (V_{cella}). Si osserva infatti come la tensione calcolata assuma per la maggior parte dei casi un valore prossimo a quella della tensione dichiarata, a

fronte di una variazione tollerabile della tensione della singola cella, sempre rimanendo all'interno del range di valori indicati in Figura 28, e assumendo nella maggior parte dei casi un numero di celle in serie (N_s) pari a 96 come riferimento generale. Sono presenti, tuttavia, dei valori diversi di N_s , dovuto al fatto che per alcuni modelli viene anche specificato un altro parametro di riferimento, ovvero la capacità totale della batteria, espressa in [Ah], la quale è influenzata da tale parametro. Per soddisfare entrambi i parametri quindi, si ricorre in alcuni casi ad un compromesso che rende il valore di N_s anche molto diverso rispetto a quello riscontrato negli altri modelli analizzati, al fine di ridurre al minimo la differenza tra i valori finali di tensione e capacità calcolati, da quelli dichiarati dalle case automobilistiche.

5.3.2 – Capacità della batteria

Come appena accennato, la successiva analisi prevede di ricalcolare la capacità della batteria espressa in [Ah], data dal rapporto tra la potenza dichiarata della batteria espressa in [kWh], e il prodotto di tre fattori: il numero di celle in serie N_s , il numero di celle in parallelo N_p , e la tensione della singola cella V_{cella} , come mostrato dalla seguente espressione:

$$Capacità = \frac{Potenza}{N_s * N_p * V_{cella}}$$

Modello veicolo	Batteria [kWh]	N_s	N_p	Tensione cella [V]	Capacità calcolata [Ah]	Capacità dichiarata [Ah]
Nissan Leaf	40	96	2	3,75	55,56	56,00
Nissan Leaf e+	62	96	3	3,75	57,41	56,30
Renault Twingo	22	96	1	3,65	62,79	78,00
Renault Zoe	55	96	2	3,65	78,00	78,00
Opel Mokka	50	108	2	3,70	62,50	?
Opel Corsa	50	96	2	4,17	62,50	?
Peugeot 208	50	96	2	4,17	62,50	?
Fiat 500e	42	96	1	3,79	115,39	120,00
BMW i3	42,2	96	1	3,667	119,88	120,00
Smart For 2	17,6	96	1	3,75	48,89	?
Tesla Model S	95	96	5	3,33	59,37	?
Audi e-tron	95	108	4	3,67	59,98	?
Xev YOYO	10,3	18	1	4	143,06	?

Tabella 3 - Analisi capacità della batteria

Anche in Tabella 3, per la maggior parte dei casi, i valori presenti sotto la voce capacità calcolata rispecchiano i valori dichiarati, a fronte di un errore dovuto all'approssimazione della tensione di cella o di altri parametri della batteria. Per i modelli in cui la capacità dichiarata non è presente (perché non facilmente reperibile online ed in letteratura), sono stati adottati gli stessi procedimenti, al fine di avere una linea guida comune, e senza generare diverse procedure di calcolo per ogni modello preso in esame.

5.3.3 – Parametri fisici del veicolo

Vengono infine definiti per ogni veicolo i parametri fisici che lo caratterizzano, quali la massa a pieno carico (GVWR) e la massa a vuoto, il coefficiente di resistenza aerodinamica C_x e l'area frontale, riportati in Tabella 4.

Modello veicolo	Massa GVWR [kg]	Massa a vuoto [kg]	C_x	Area frontale [m²]
Nissan Leaf	1995	1580	0,28	2,27
Nissan Leaf e+	2140	1756	0,28	2,27
Renault Twingo	1518	1208	0,35	1,95
Renault Zoe	1988	1577	0,29	1,86
Opel Mokka	2015	1540	0,3	2,00
Opel Corsa	1920	1530	0,29	2,00
Peugeot 208	1910	1500	0,29	2,00
Fiat 500e	1726	1465	0,31	2,00
BMW i3	1710	1345	0,29	2,00
Smart For 2	1310	1095	0,35	2,00
Tesla Model S	2163	-	0,21	2,00
Audi e-tron	3150	2595	0,28	2,00
Xev YOYO	750	530	0,35	2,00

Tabella 4 - Parametri dei veicoli

In particolare, per ogni veicolo verranno effettuati due test, uno con la massa a pieno carico, e un secondo con la massa a vuoto, per poi valutare la media tra questi due valori e considerare tale parametro come l'autonomia del veicolo simulata in ambiente Simulink.

In questo caso si nota come i valori dell'area frontale siano gli stessi per la maggior parte dei veicoli, dato che sono difficilmente reperibili, e pertanto sono stati assunti pari a 2 m², come compromesso tra tutti i veicoli di piccole, medie e grandi dimensioni, ma che inevitabilmente porteranno a degli errori in fase di valutazione dell'autonomia.

5.4 – Analisi ed elaborazione dati

Per effettuare la validazione del modello creato in ambiente Simulink, si prende come punto di riferimento il ciclo WLTP definito dalla normativa, con una durata di 30 minuti ed una distanza percorsa pari a 23,25 km, si ipotizza una carica iniziale della vettura pari al 100%, si misura la percentuale residua dello state of charge al termine del primo ciclo WLTP di durata pari a 1800 secondi, e si valuta la percentuale di SOC speso per effettuare il primo ciclo.

Si esegue quindi una proporzione tra la percentuale di SOC consumato per il primo ciclo WLTP, e la corrispettiva durata (30 minuti), e si stima il tempo totale necessario per scaricare completamente la batteria del veicolo, come mostrato nella seguente relazione. Questo passaggio non è altro che uno step per ottimizzare il tempo di calcolo della simulazione, onde evitare di dovere effettuare una simulazione troppo breve o troppo lunga, non riuscendo a identificare il tempo totale necessario per la scarica del veicolo (nel primo caso), o eseguendo calcoli inutili con il raggiungimento della percentuale dello state of charge pari a 0%, ed il suo mantenimento fino al termine del percorso (nel secondo caso). La relazione di proporzionalità appena descritta è di seguito riportata, con un coefficiente di sicurezza pari a 1,2 per avere una maggiore probabilità di determinare il momento in cui lo state of charge si annulla, senza però rendere troppo lunga la simulazione:

$$Durata\ stimata\ [min] = \frac{Durata\ standard\ ciclo\ WLTP\ [min]}{Percentuale\ SOC\ consumata\ per\ un\ ciclo\ WLTP} * 100 * 1,2$$

Nello specifico, il coefficiente correttivo pari a 1,2 è stato ottimizzato nel tempo, considerando il valore massimo tra tutti i coefficienti correttivi dati dal rapporto tra la durata della simulazione in ambiente Simulink e quella stimata tramite la proporzione discussa al punto precedentemente. Infatti, il valore iniziale era pari a 1,3 per sicurezza, mentre successivamente è stato valutato il massimo tra questi coefficienti, pari a 1,18, il quale arrotondato per eccesso (sempre per motivi di sicurezza) è stato dichiarato pari a 1,2.

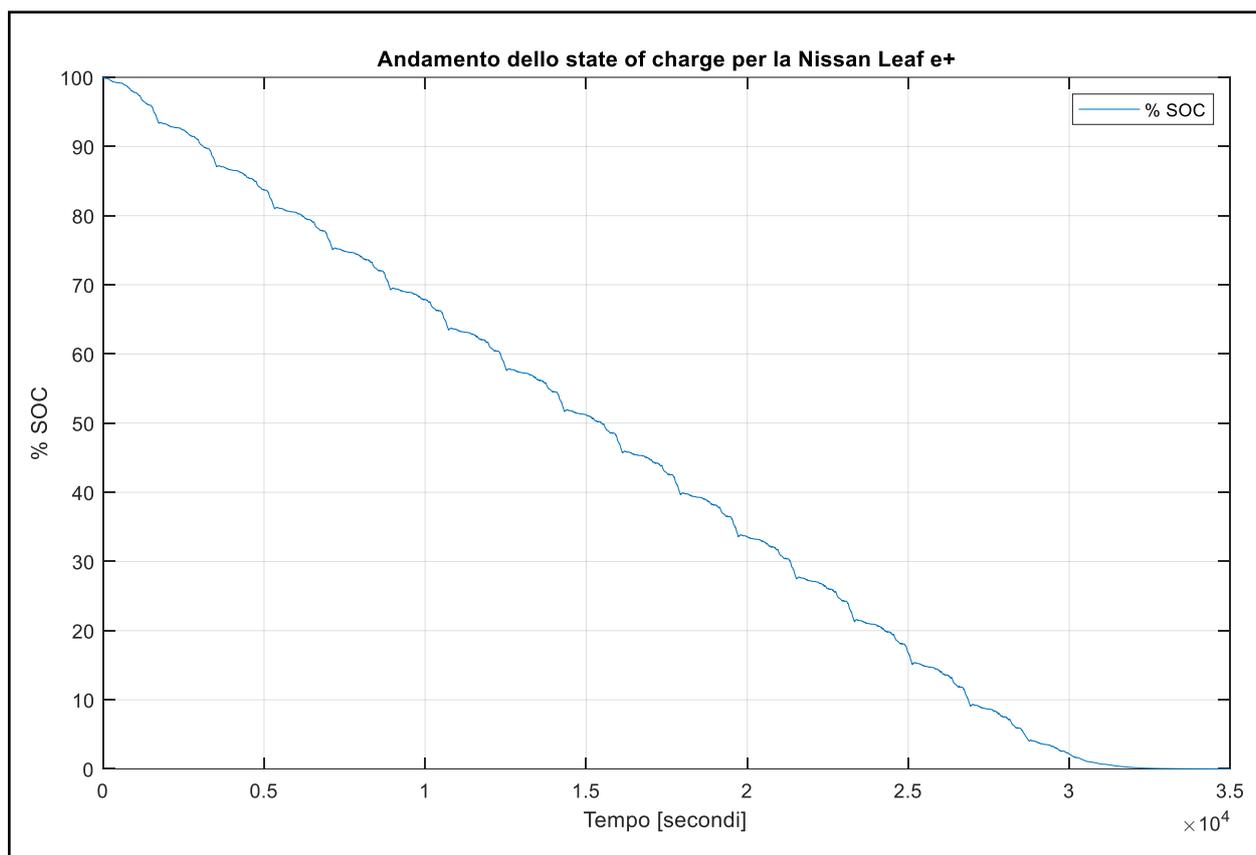


Figura 29 – Andamento dello state of charge per la Nissan Leaf e+

Una volta stimato il tempo necessario per far scaricare la batteria del veicolo, si procede con la simulazione del ciclo WLTP ripetuto ciclicamente, fino al termine del tempo stimato, determinato nel passaggio precedente. In questo modo si riesce a valutare dal grafico dell'andamento dello state of charge il momento esatto in cui esso tocca il valore 0%. Tuttavia, dato che il suo andamento risulta anomalo rispetto al comportamento che presenta normalmente nei cicli WLTP, si prende come tempo di riferimento della scarica completa della batteria il valore pari al 2% dello state of charge.

Una volta definito questo istante di tempo, attraverso un'altra proporzione (simile alla precedente), si valuta la lunghezza totale del percorso che il veicolo ha conseguito:

$$\text{Autonomia simulata [Km]} = \frac{\text{Lunghezza ciclo WLTP [km]}}{\text{Durata ciclo WLTP [min]}} * \text{Durata simulazione [min]}$$

Si riporta di seguito un esempio di quanto appena detto, con l'aggiunta del grafico dello state of charge relativo alla Nissan Leaf e+, valutato ipotizzando un valore della massa del veicolo

pari al GVWR (Gross Vehicle Weight Rating), pari a 2140 kg: la durata stimata è pari a 457,53 minuti, la durata effettiva della simulazione fino al raggiungimento del valore del 2% di SOC è pari a 500,87 minuti, mentre l'autonomia simulata è pari a 381,33 [km], rispetto ai 385 [km] dichiarati dalla casa costruttrice.

Nello specifico, viene mostrato in Figura 30 l'andamento anomalo dello SOC nella fase finale del percorso, che non corrisponde al comportamento ciclico che ha mostrato precedentemente, assumendo un andamento maggiormente orizzontale. Questo particolare giustifica la scelta di prendere come punto di riferimento il valore del 2% dello SOC, invece del valore di SOC pari a 0%. Infatti, si può notare come il ciclo WLTP venga ripetuto in maniera corretta nella parte sinistra della Figura 30 mentre assume un andamento anomalo a partire dalla parte centrale della figura stessa.

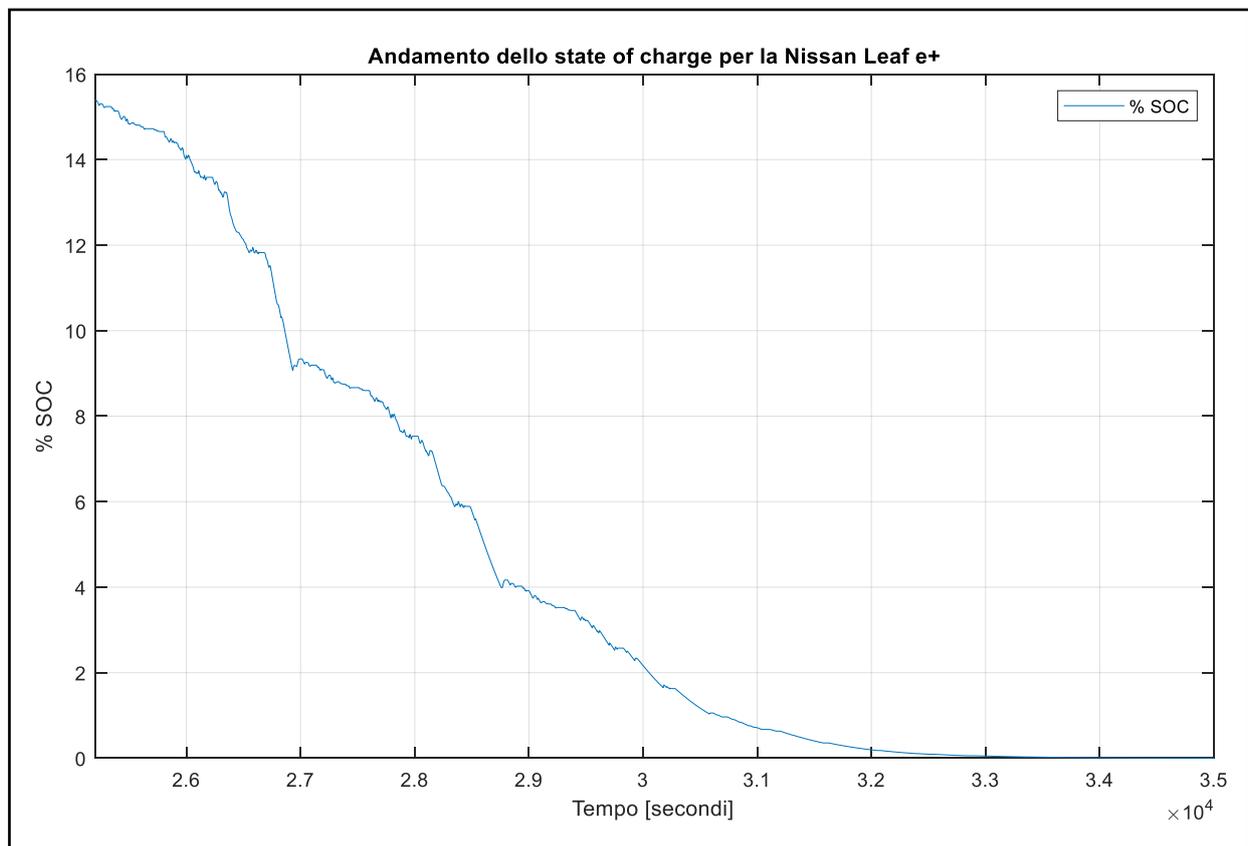


Figura 30 - Anomalia dello SOC a fine percorso

Questa analisi viene ripetuta per tutti i veicoli presi in considerazione per la validazione del modello Simulink (12 modelli differenti), variando di volta in volta i valori caratteristici delle singole vetture quali massa (GVWR), coefficiente di resistenza aerodinamica e dimensioni del pacco batteria, per poi eseguire tutte le simulazioni una seconda volta variando per ognuna di

esse il parametro di massa, ed inserendo il valore della massa a vuoto. Una volta ottenute due simulazioni per lo stesso veicolo, in cui l'unica differenza è relativa alla massa (GVWR e massa a vuoto), si effettua una media tra le autonomie così calcolate, stimando l'autonomia del veicolo in condizioni usuali di funzionamento, ovvero con un carico medio, evitando la condizione di caso limite. Lo stesso ragionamento è stato esteso anche agli altri parametri derivanti dalle simulazioni, per avere dei valori che potessero rispecchiare maggiormente la realtà. Vengono di seguito riportati i valori medi ottenuti per diversi veicoli che sono stati presi in esame per la validazione del modello, seguiti dalla Figura 31 in cui si confrontano graficamente le autonomie dei veicoli reali e le autonomie dei veicoli simulati. Come mostrato dal grafico, si può affermare che seppur con un certo errore, in media pari a 1,44%, il modello realizzato in ambiente Simulink riesce a simulare fedelmente l'autonomia reale dei veicoli.

Tale differenza nei risultati è dovuta ad una propagazione degli errori, con parametri difficili da misurare o da reperire, quali il coefficiente aerodinamico, l'area frontale del veicolo, la massa effettiva della vettura con la quale è stata svolta la prova, le dimensioni esatte dell'impianto batteria installato a bordo, oltre che alla natura chimica dello stesso, e le condizioni dell'ambiente esterno nel momento della prova. Si nota ad esempio come il valore simulato dell'Audi e-tron sia superiore a quello reale, dato che l'area frontale assunta per effettuare la simulazione è stata approssimata a 2 m², che sicuramente sottostima quella effettiva reale.

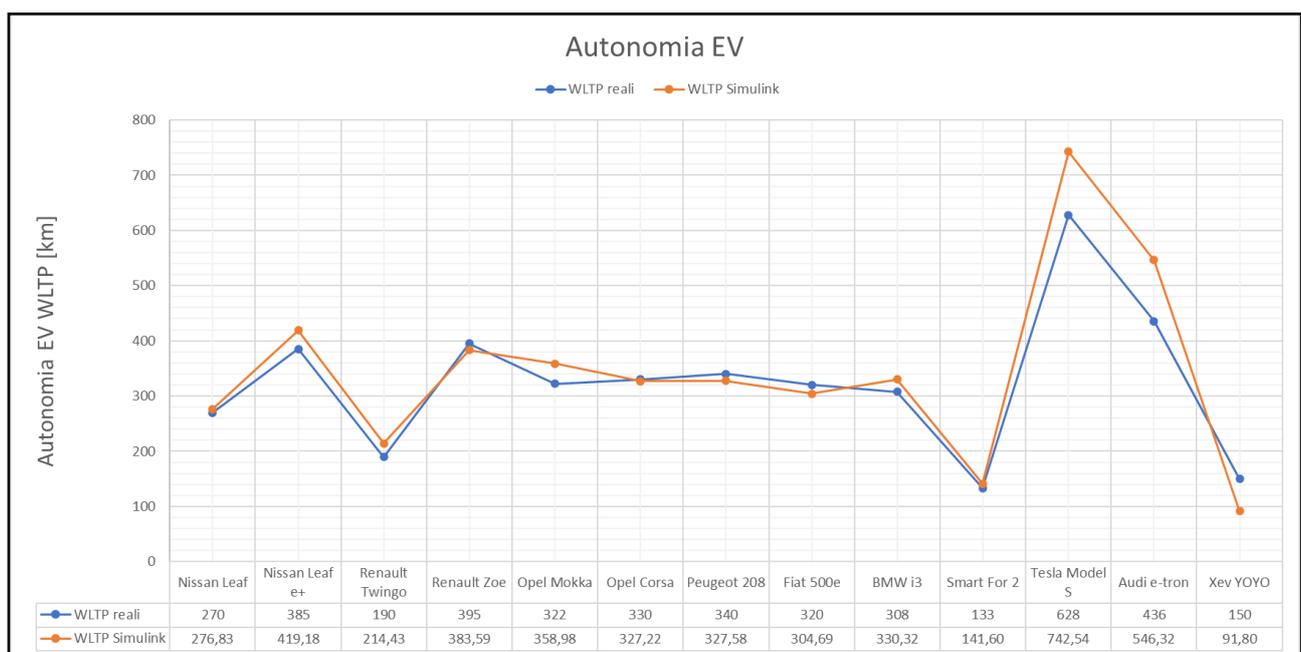


Figura 31 - Confronto tra le autonomie dei veicoli reali e simulati con il modello

Modello veicolo	Primo ciclo WLTP			Totale stimato	Totale simulato	
	% SOC iniziale	% SOC finale	% SOC consumato	Durata [min]	Durata [min]	Distanza [km]
<i>Nissan Leaf</i>	100,00	90,99	9,01	334,59	357,20	276,83
<i>Nissan Leaf e+</i>	100,00	93,84	6,16	488,71	500,87	381,33
<i>Renault Twingo</i>	100,00	88,70	11,30	266,34	276,68	214,43
<i>Renault Zoe</i>	100,00	93,48	6,52	462,16	494,96	383,59
<i>Opel Mokka</i>	100,00	92,99	7,01	430,79	463,20	358,98
<i>Opel Corsa</i>	100,00	92,34	7,66	393,67	422,23	327,22
<i>Peugeot 208</i>	100,00	92,40	7,60	396,69	422,68	327,58
<i>Fiat 500e</i>	100,00	91,88	8,12	370,09	393,15	304,69
<i>BMW i3</i>	100,00	92,54	7,46	404,11	426,22	330,32
<i>Smart For 2</i>	100,00	82,99	17,02	176,61	182,71	141,60
<i>Tesla Model S</i>	100,00	96,46	3,54	848,27	958,12	742,54
<i>Audi e-tron</i>	100,00	95,07	4,93	610,11	704,93	546,32
<i>Xev YOYO</i>	100,00	74,53	25,47	118,11	118,45	91,80

Tabella 5 - Risultati delle simulazioni sull'autonomia totale dei veicoli elettrici

Modello veicolo	Coefficiente correttivo [min]	Coefficiente correttivo [km]	Errore % relativo dell'autonomia
<i>Nissan Leaf</i>	1,07	0,98	2,07%
<i>Nissan Leaf e+</i>	1,11	0,92	8,07%
<i>Renault Twingo</i>	1,04	0,89	11,15%
<i>Renault Zoe</i>	1,07	1,03	-3,33%
<i>Opel Mokka</i>	1,08	0,90	9,88%
<i>Opel Corsa</i>	1,07	1,01	-1,17%
<i>Peugeot 208</i>	1,07	1,04	-4,17%
<i>Fiat 500e</i>	1,06	1,05	-5,19%
<i>BMW i3</i>	1,06	0,97	6,49%
<i>Smart For 2</i>	1,03	0,97	5,95%
<i>Tesla Model S</i>	1,13	0,85	15,43%
<i>Audi e-tron</i>	1,16	0,80	20,05%
<i>Xev YOYO</i>	1,00	1,63	-63,45%
<i>Massimo</i>	1,16	1,69	20,05%
<i>Media</i>	1,08	1,01	-1,44%

Tabella 6 - Analisi degli errori e dei coefficienti correttivi

5.5 – Conclusioni

È stato dimostrato che il modello sviluppato in ambiente Simulink è valido ed attendibile, seppur con piccoli errori, e può essere adottato come modello di partenza per stimare le autonomie dei veicoli elettrici in funzione dei parametri caratteristici di ogni vettura.

Tuttavia, dato che l'autonomia dei veicoli elettrici reali, relativa alla messa su strada, risulta sempre inferiore a quella dichiarata dalle case automobilistiche (a prescindere dai fattori in gioco), è stato inserito un coefficiente correttivo di modulo pari a 0,8 al termine del calcolo della coppia rigeneratrice, che ingloba (seppur in prima approssimazione) tutte le inefficienze che portano ad una riduzione dell'autonomia, rispetto alle condizioni dichiarate. In questo modo, si va a ridurre la coppia massima rigeneratrice, al fine di attenuare il fenomeno della ricarica rigenerativa, e ridurre di conseguenza l'autonomia, per rendere maggiormente veritiero il modello creato; non a caso, nel modello utilizzato si tende a massimizzare la frenata rigenerativa, che è un'altra grande assunzione, non sempre vera nel caso reale.

6 – Logica e-Pedal

6.1 – Introduzione

Il sistema e-Pedal riscrive la concezione di guida attuale, attraverso l'implementazione di una logica di comando che consente di guidare il veicolo attraverso l'utilizzo di un solo pedale, che racchiude le funzioni di acceleratore e freno allo stesso tempo.

Con l'implementazione di tali logiche, il sistema e-Pedal modifica radicalmente il modo di guidare, attraverso un approccio monopedalico, eliminando quindi il vecchio concetto di sistema a due pedali con acceleratore e freno, semplificando la guida nel traffico cittadino, e rigenerando energia elettrica in maniera ancora più efficiente rispetto a quanto fatto sinora.

6.2 – Obiettivi del sistema e-Pedal

Il sistema e-Pedal consente di ottimizzare la quantità d'energia elettrica che si recupera in fase di decelerazione, attraverso il sistema della frenata rigenerativa, grazie alla logica implementata e trattata nel seguito. Si riducono inoltre le emissioni del particolato proveniente dall'usura delle pastiglie dei freni classici (che qui vengono limitate al minimo), e si ha un approccio di guida maggiormente sicuro, grazie alla frenata rigenerativa che decelera il veicolo in tempi minori, particolarmente adatto per i percorsi urbani in cui accelerazioni e decelerazioni sono molto frequenti. In ultimo, ma non meno importante si introduce questa nuova concezione di guida, per consentire al conducente di interfacciarsi solo con un pedale, seppure quello del freno (secondo pedale) rimarrà comunque attivo e pronto per essere utilizzato.

6.3 – Descrizione della logica dell'e-Pedal ed ipotesi di base

In questa prima fase di sperimentazione, la logica del sistema e-Pedal adottata per simulare il comportamento di un veicolo elettrico prevede una modulazione del livello di intensità della frenata rigenerativa, secondo l'andamento di due parametri letti come input: la velocità e l'accelerazione del veicolo.

Nel caso in esame, questi parametri sono standard ed immutabili, dato che vengono definiti dalla normativa WLTP utilizzata per la simulazione del modello e vengono quindi presi come valori di input per impostare la logica del sistema e di come esso debba gestire l'intensità della frenata rigenerativa. Nello specifico, si adotta una suddivisione per range dei due fattori input precedentemente citati, associando a ciascun range un livello di intensità di rigenerazione, e utilizzando un principio simile a quello della sovrapposizione degli effetti, si identifica un livello globale di intensità rigenerativa, che il computer di bordo adotterà in fase di frenata rigenerativa per ripristinare quanta più carica possibile. Inoltre, verranno modificate le lookup table (come quella relativa allo state of charge, precedentemente mostrata in Tabella 1) con dei nuovi parametri per ogni range, in modo da massimizzare la ricarica rigenerativa e incrementare l'autonomia.

Fin qui è stato introdotto il sistema e-Pedal, descrivendo i benefici e le differenze che lo contraddistinguono da un pedale classico; ora verranno analizzate le logiche di questo innovativo sistema, per averne una migliore comprensione, analizzando anche le ipotesi sulle quali si basa tutta la logica che vi è dietro.

Il sistema di lettura della posizione del pedale, viene gestito in maniera tale da poter considerare l'e-Pedal come un pedale tradizionale, ma con la possibilità di oscillare tra la posizione di riposo corrispondente allo 0% di inclinazione, ed il 100%, corrispondente al fondo corsa del pedale. La lettura di questo parametro definisce quindi il comportamento che il conducente andrà ad assumere durante la guida, ed in particolare come esso richieda coppia motrice o coppia frenante rigeneratrice. Ciononostante, il pedale tradizionale del freno rimarrà sempre attivo e pronto ad intervenire, nel caso in cui la sola coppia rigenerativa non dovesse essere sufficiente per arrestare il veicolo in tempi sicuri, quindi garantendo sempre la sicurezza delle persone a bordo. Nello specifico, ogniqualvolta il conducente abbia la necessità di frenare in maniera importante per la propria sicurezza, tutta la decelerazione che il sistema

frenante classico riuscirà a fornire (ovvero quello dissipativo per attrito sui dischi), verrà aggiunta alla massima decelerazione che il sistema frenante rigenerativo starà già erogando.

Questo caso appena mostrato è ovviamente una descrizione limite, in quanto il sistema e-Pedal consente normalmente una decelerazione maggiore rispetto a quelle fornite dalle comuni vetture, dato che in fase di rilascio del pedale, oltre alla decelerazione dovuta all'inerzia del veicolo, vi è anche quella dovuta alla frenata rigenerativa (se il pedale ha un'angolazione corrispondente al 50% della propria escursione massima).

Ovviamente, il tutto dipenderà dallo stile di guida del conducente, e dal modo in cui esso intenda guidare la vettura, se più sportivo o meno, se voglia salvaguardare l'autonomi o meno: per stili di guida maggiormente scattanti ed impulsivi si richiederà in percentuale maggiore anche l'uso del pedale del freno, mentre se lo stile di guida dovesse essere più rilassato e meno sportivo, allora il veicolo potrebbe persino essere guidato con l'utilizzo del solo e-Pedal, senza ricorrere al freno classico.

6.4 – Modulazione della frenata rigenerativa

Chiarita la logica generale secondo cui viene attivato il sistema di rigenerazione tramite la decelerazione della vettura, vengono ora esposte le metodologie che definiscono l'intensità della frenata rigenerativa, e di come essa possa variare in tempo reale durante il viaggio.

Il valore della coppia massima (espressa in Nm) che il sistema è in grado di recuperare attraverso la frenata rigenerativa per ripristinare la carica della batteria, viene moltiplicata per un coefficiente definito come coefficiente globale di rigenerazione, il quale altro non è che il prodotto di quattro diversi coefficienti: due di essi dipendono dalla velocità di crociera del veicolo, uno dipende dallo state of charge del veicolo, mentre il quarto dipende dall'intensità dell'accelerazione o per meglio dire, della decelerazione, valutata mediante la lettura della posizione del pedale. Nello specifico, vengono costruite delle lookup table che ricevono in ingresso i valori di una variabile (ad esempio la velocità della vettura), e restituiscono come valore di output un coefficiente rigenerativo, che verrà poi moltiplicato insieme a quelli delle altre variabili descritte, in modo da ottenere il coefficiente finale di rigenerazione. Questo valore finale che si ottiene, sarà in modulo sempre compreso tra zero e uno (nella migliore delle condizioni sarà pari ad uno), e verrà moltiplicato per il valore della coppia massima che il sistema sarà in grado di ripristinare, in modo da massimizzare la frenata rigenerativa in termini di energia ripristinata.

6.4.1 – Lookup table

Le Lookup table sono delle tabelle a cui il modello Simulink fa riferimento per implementare la logica di comando della frenata rigenerativa. Nel modello implementato con la logica dell'e-Pedal ve ne sono quattro in totale, di cui due in particolare, definiscono i coefficienti rigenerativi in funzione dello state of charge della batteria del veicolo e della velocità di crociera dello stesso, che già erano presenti nel modello originale, senza la logica dell'e-Pedal. Nello caso in esame, la logica implementata nel modello Simulink prevede l'acquisizione di dati di input quali lo state of charge, la velocità del veicolo, e la decelerazione, ed in funzione di ognuno di questi parametri, viene restituito come output un coefficiente, il quale verrà moltiplicato per i restanti tre, determinando il coefficiente globale di rigenerazione, ovvero un quinto coefficiente che andrà a moltiplicare la coppia massima estraibile dal veicolo in caso di frenata rigenerativa, per ottenere la coppia rigenerativa effettiva che verrà utilizzata per ripristinare la carica del veicolo.

Per preservare la vita a lungo termine della batteria del veicolo, la carica residua deve essere sempre compresa tra il 20% e l'80%. Prendendo questi valori come riferimenti da mantenere nelle lookup table, si modificano gli elementi presenti al loro interno in modo tale da garantire una rigenerazione al massimo dell'efficacia fino a quanto la batteria rimane al di sotto dell'80% dello state of charge, mentre per valori compresi tra l'80% ed il 100%, l'energia recuperabile attraverso la frenata rigenerativa viene moltiplicata per un coefficiente minore di uno, in maniera da limitare la ricarica della batteria del veicolo, e salvaguardare la salute a lungo termine del pacco batteria.

Seguendo queste ipotesi di base, sono state modificate le lookup table relative allo state of charge, e alla velocità di crociera del veicolo, in modo da incrementare l'energia ripristinata attraverso questo sistema, seppur di pochi decimi di punti percentuali.

6.4.2 – Primo coefficiente di rigenerazione

La lookup table relativa allo state of charge definisce la capacità di rigenerare corrente attraverso la frenata rigenerativa, in funzione del livello di carica residua della batteria. Nella lookup table originale del modello Simulink (riportata in Tabella 7), nel caso in cui lo state of charge fosse stato superiore all'70%, l'intensità della frenata rigenerativa diminuisce in maniera da salvaguardare la salute della batteria, limitando la corrente effettiva che il veicolo sarebbe stata in grado di recuperare in fase di rigenerazione, fino ad annullarla progressivamente una volta che raggiunto un livello di carica pari al 100%. Fino al 70% invece, la centralina di controllo inviava l'ordine di ripristinare il massimo valore di energia recuperabile dalla frenata rigenerativa, mentre una volta superato questo valore di soglia pari al 70%, la capacità di rigenerare diminuiva progressivamente.

% SOC	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Coefficiente rigenerativo	1	1	1	1	1	1	1	1	0,7	0,35	0

Tabella 7 - Lookup table originale relativa allo SOC

Questa lookup table presentata in Tabella 7 è stata modificata, incrementando il valore di soglia minimo, oltre il quale si limita la ricarica rigenerativa, portandolo da un valore soglia iniziale pari al 70% dello state of charge, fino ad un valore pari all'80%. Queste modifiche sono mostrate nella lookup table presente in Tabella 8.

% SOC	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Coefficiente rigenerativo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,35	0

Tabella 8 - Lookup table aggiornata relativa allo SOC

Dal confronto tra queste Lookup table, si evidenzia come la sola modifica della soglia minima di attivazione dello state of charge appena descritta, abbia fatto variare lo SOC dello 0,47%, su un intervallo di tempo pari a 1800 secondi (ovvero un intero ciclo WLTP), e con le caratteristiche descritte per il caso della Nissan Leaf e+ con massa a pieno carico.

6.4.3 – Secondo coefficiente di rigenerazione

La lookup table relativa alla velocità di crociera del veicolo definisce una logica OFF/ON, secondo la quale al di sotto di una certa velocità di soglia, la frenata rigenerativa non viene applicata, mentre al di sopra di un valore massimo di soglia, viene abilitata e massimizzata. Nell'intervallo compreso tra questi due valori di soglia (minimo e massimo), si effettua una interpolazione lineare tra i valori zero ed uno in funzione della velocità, che sarà quindi compresa tra i 5 m/s ed i 9 m/s, e si recupera solo una percentuale della quantità massima di energia derivante dalla frenata rigenerativa. La lookup table in questione del modello Simulink originale viene riportata in Tabella 9.

Velocità	5	9
Off/On	0	1

Tabella 9 - Lookup table off/on originale relativa alla velocità

La lookup table appena mostrata, viene modificata per la logica dell'e-Pedal, introducendo dei valori di soglia OFF/ON inferiori a quelli precedenti, in maniera tale da poter massimizzare la frenata rigenerativa anche per bassi valori di velocità, con i valori di soglia minimo e massimo rispettivamente pari a 2 m/s e 3 m/s, come mostrato nella Tabella 10 sotto riportata.

Velocità	2	3
Off/On	0	1

Tabella 10 - Lookup table off/on del sistema e-Pedal relativa alla velocità

Al variare dei parametri appena descritti, ovvero delle due lookup table e di un terzo parametro quale lo state of charge iniziale della simulazione, vengono effettuati dei test per vedere alla fine di un ciclo WLTP quale sia la carica residua, e come queste piccole modifiche alla logica del sistema di rigenerazione influenzino lo stato della carica finale della vettura. Le variazioni sullo state of charge (SOC) che si riscontrano, vengono di seguito mostrate in Tabella 11, nella quale sono riportate sei possibili combinazioni divise tra due macro-classi: lookup table originarie o modificate, rispettivamente denominate OLD e NEW, e tre diverse condizioni dello SOC iniziale, pari al 100%, all'80% o al 50%. Per entrare nel merito, i casi relativi allo SOC iniziale pari al 100% prevedevano un coefficiente rigenerativo pari a 0%, le simulazioni con lo SOC iniziale pari all'80% prevedevano nel caso originario un fattore

rigenerativo pari a 0,7, mentre nella nuova configurazione lo stesso coefficiente rigenerativo è pari a 1; ed infine, nel caso dello SOC iniziale pari al 50%, entrambi i coefficienti rigenerativi sono unitari.

Velocità	SOC	SOC iniziale	Coefficiente rigenerativo	SOC finale	Δ SOC
old	old	100	0	93,44298	0,026367
new	new	100	0	93,46934	
old	old	80	0,7	74,14599	0,473116
new	new	80	1	74,6191	
old	old	50	1	44,00103	0,27356
new	new	50	1	44,27459	

Tabella 11 - Confronto dello SOC al variare delle lookup table

Dai dati ricavati tramite le simulazioni effettuate con le specifiche della Nissan Leaf e+, rispetto alle lookup table originali si notano sostanziali differenze tra i risultati ottenuti con l'implementazione dei nuovi parametri nelle lookup table, a parità della percentuale di carica iniziale della vettura:

Per livelli di SOC iniziale elevati, come nel caso dello SOC pari al 100%, la differenza tra la vecchia configurazione e la nuova configurazione delle lookup table è circa nulla, dato che il coefficiente rigenerativo è circa pari a zero;

Per livelli iniziali di SOC pari all'80%, grazie alla nuova lookup table implementata, si nota un incremento di SOC finale pari allo 0,47% al termine del ciclo WLTP, infatti nella configurazione originale vi era un coefficiente rigenerativo pari a 0,7, mentre nella nuova configurazione il coefficiente rigenerativo è unitario dallo SOC pari all'80% in poi (con andamento decrescente).

Per livelli iniziali di SOC pari al 50%, non si riscontrano particolari modifiche al termine del ciclo WLTP, dato che il coefficiente di rigenerazione è unitario in entrambe le casistiche (della nuova e della vecchia configurazione delle lookup table relative allo SOC), mentre l'unica differenza riscontrabile è dovuta ai valori di velocità: nella lookup aggiornata sono presenti dei valori di soglia inferiori rispetto a quelli presenti nelle lookup table originali, attivando in anticipo (e mantenendo attiva) la frenata rigenerativa a partire da velocità basse, dell'ordine dei 7 km/h, anziché dei 15 km/h come mostrato nella Lookup table originale.

I risultati appena descritti sono rappresentati nei grafici di Figura 32 e di Figura 33, rispettivamente delle vecchie condizioni, e delle nuove condizioni con la logica dell'e-Pedal, che consentono un incremento dello SOC, specie nel range appena sotto l'80% si SOC iniziale, come mostrato anche in Tabella 11.

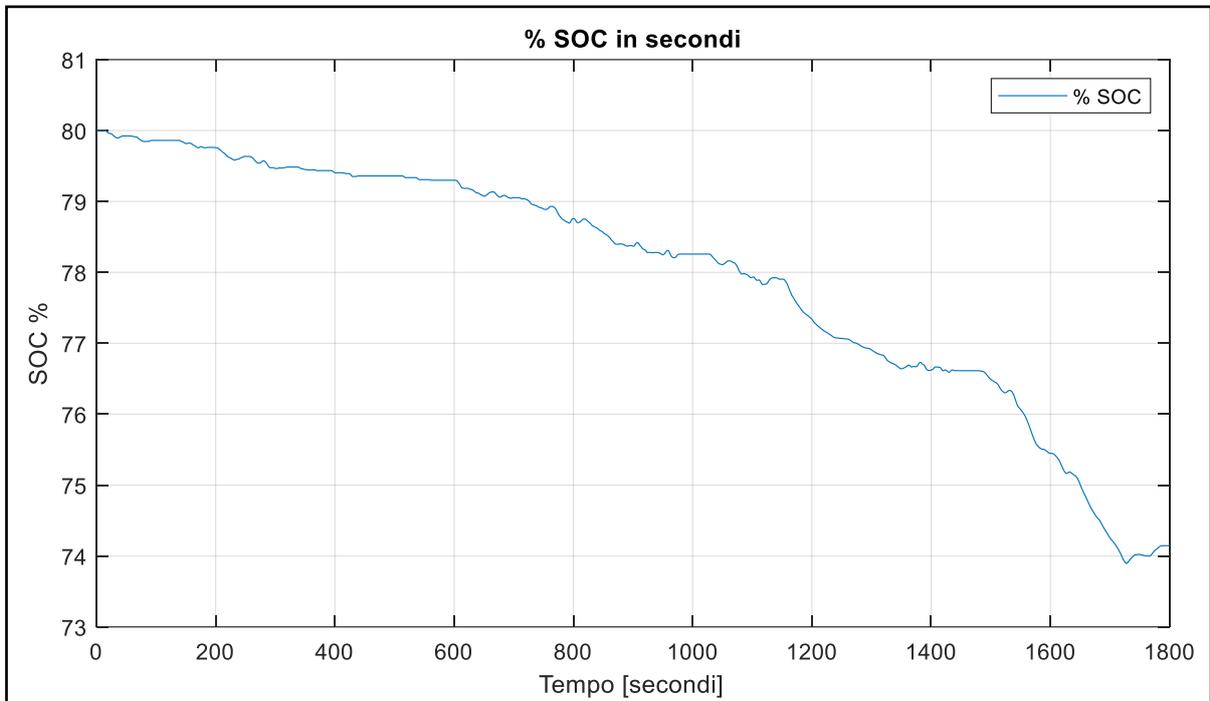


Figura 32 - Andamento dello SOC con le condizioni originali

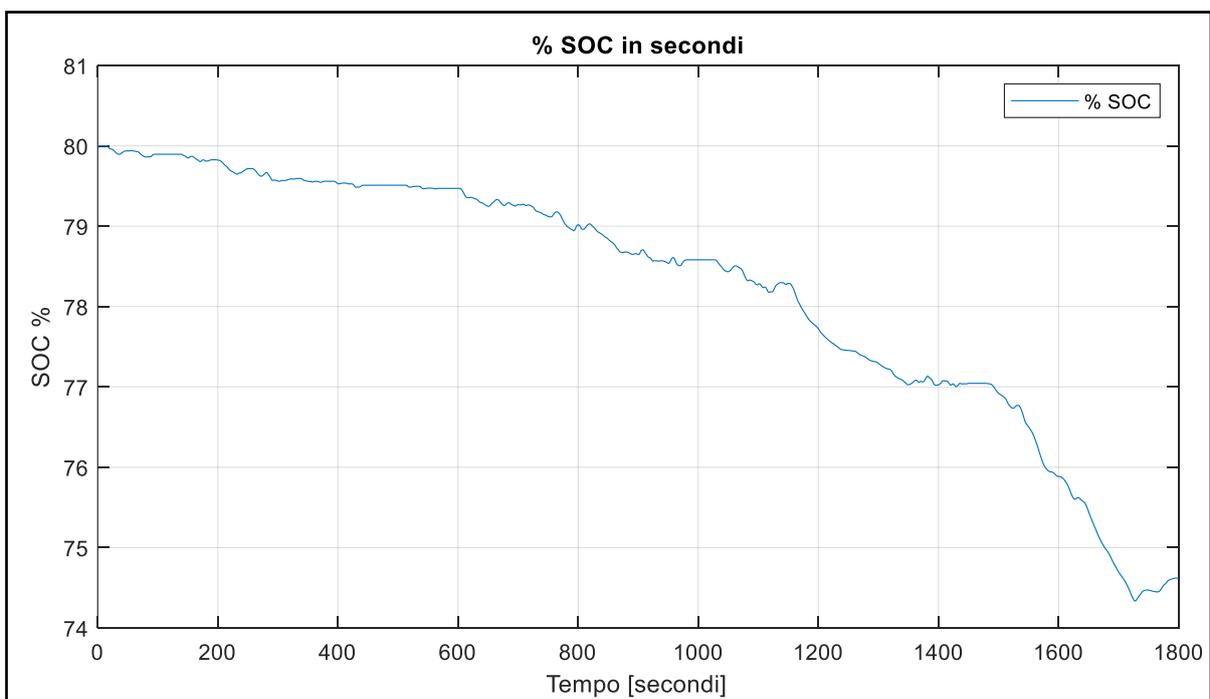


Figura 33 - Andamento dello SOC con le nuove condizioni

Le due lookup table presenti in Tabella 7 e in Tabella 9 fanno riferimento a due condizioni che già facevano parte del modello originale in ambiente Simulink, mentre le altre due condizioni che sono state implementate con l'introduzione del sistema e-Pedal e che verranno trattate nel seguito, andranno a determinare il terzo ed il quarto coefficiente di rigenerazione, riferendosi rispettivamente ai parametri di velocità e pendenza del pedale. Una volta definiti anche questi due ultimi coefficienti sarà allora possibile calcolare il coefficiente globale di rigenerazione.

6.4.4 – Terzo coefficiente di rigenerazione

Il terzo coefficiente di rigenerazione riguarda l'analisi della velocità puntuale del veicolo, ed in particolare, fa riferimento all'andamento della curva della velocità WLTP definita da tale normativa, nella quale viene riportato il valore in modulo che la velocità del veicolo deve assumere nel corso del tempo, fino al raggiungimento dei 1800 secondi previsti dal ciclo, ovvero dopo 30 minuti, come riportato in Figura 34.

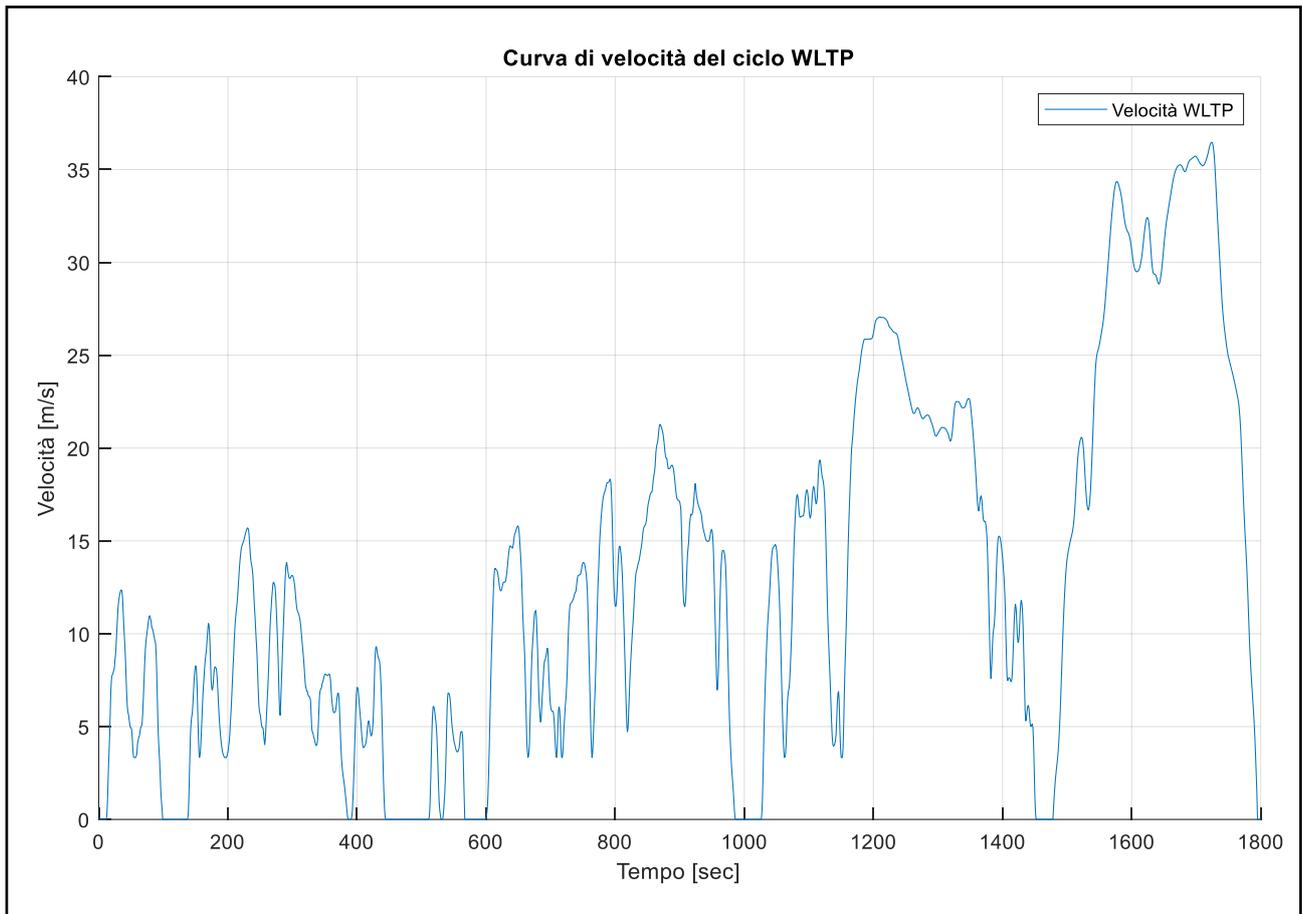


Figura 34 - Curva di velocità del ciclo WLTP

La logica implementata del sistema e-Pedal prevede l'acquisizione del modulo della velocità per ogni istante di tempo, ed in funzione della lookup table di seguito riportata in Tabella 12, ne genera un coefficiente rigenerativo.

Velocità [km/h]	0	50	80	90	100	110	120	130
Velocità [m/s]	0	13,89	22,22	25,00	27,78	30,56	33,33	36,11
Coefficiente rigenerativo	1	1	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0

Tabella 12 - Lookup table della velocità

Come mostrato dai valori presenti in questa lookup table relativa alla velocità del veicolo, per valori di velocità fino ai 50 km/h si ha un coefficiente di rigenerazione massimo (unitario), mentre per valori sempre più elevati di velocità si ottiene una diminuzione del coefficiente di rigenerazione, fino ad arrivare allo zero, corrispondente ad una rigenerazione nulla, una volta raggiunti o superati i 130 km/h. Grazie alla logica della lookup table, tutti i valori che non sono qui riportati, vengono interpolati linearmente: ad esempio per una velocità di crociera pari a 65 km/h, si avrà un coefficiente di rigenerazione pari a 0,75.

6.4.5 – Quarto coefficiente di rigenerazione

Il quarto coefficiente di rigenerazione riguarda l'analisi della decelerazione, ed in particolare, fa riferimento all'andamento della curva che definisce la pendenza del pedale tra lo 0% ed il 50% di inclinazione, per ogni istante di tempo del ciclo WLTP, fino al raggiungimento dei 1800 secondi previsti dal ciclo. In Figura 35 di seguito riportata, viene mostrato l'andamento della pendenza dell'e-Pedal durante un ciclo WLTP, e descrive le fasi di accelerazione e decelerazione del veicolo, per valori della curva rispettivamente maggiori di 45° e minori di 45°, pari al 50% della pendenza massima del pedale. Nello specifico, in tutte le fasi in cui si è al di sotto dei 45° (al di sotto del 50% della corsa massima del pedale), il conducente richiede una decelerazione, ed entra quindi in azione la logica della frenata rigenerativa. Si nota inoltre come in alcuni intervalli di tempo, la curva presenta dei tratti rettilinei orizzontali, a conferma del fatto che in quegli stessi intervalli di tempo, la velocità della vettura è nulla, e non le si impartiscono né una accelerazione, né una decelerazione, anzi: in questi intervalli di tempo, i valori della pendenza del pedale dovrebbero assumere un andamento differente, ovvero pari a 0° (corrispondente allo 0%), dato che si assiste al fermo del veicolo, con il rilascio completo del pedale, che qui viene invece registrata fisso sui 45 gradi, ovvero al 50% di escursione.

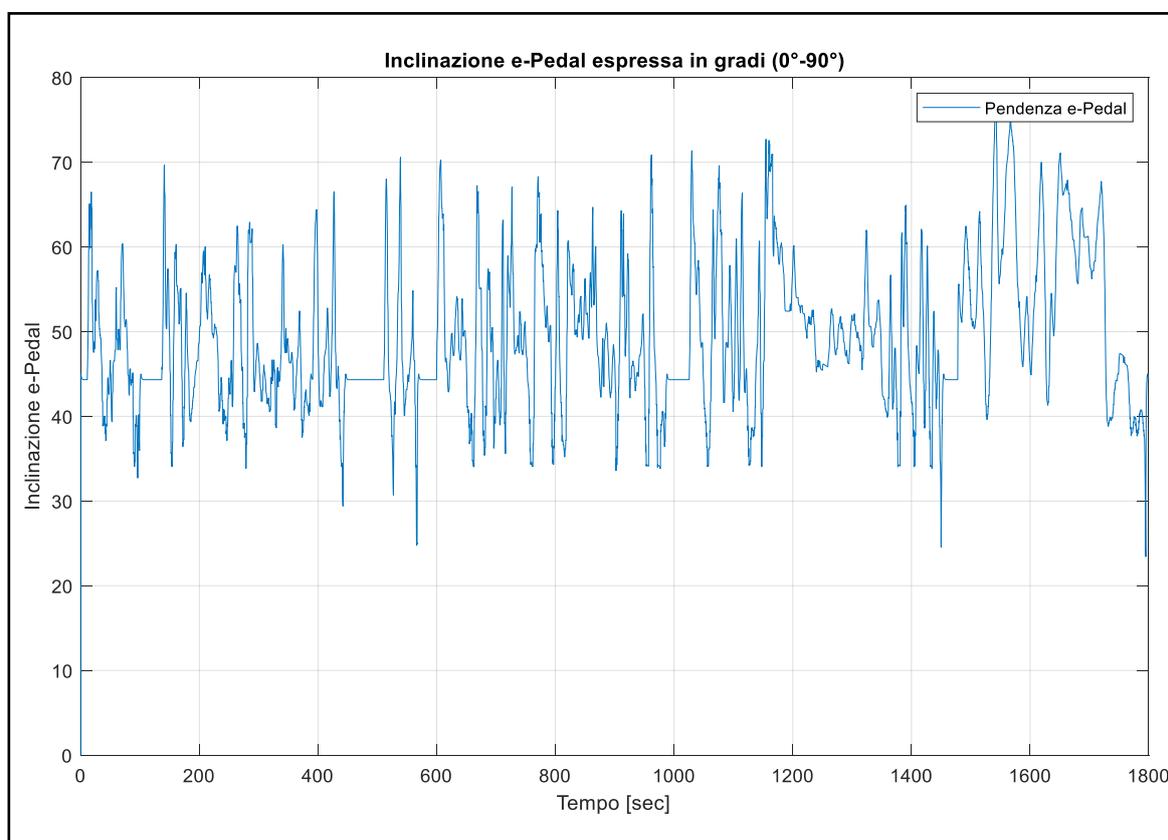


Figura 35 – Andamento della pendenza dell'e-Pedal in un ciclo WLTP

La rappresentazione della curva relativa all'inclinazione dell'e-Pedal, deriva da una semplice proporzione dell'immagine originale riportata in Figura 36, che mostra il comportamento del freno e dell'acceleratore per il veicolo elettrico classico con il sistema tradizionale a due pedali. In particolare, tutte le fasi di accelerazione sono diventate la parte con inclinazione superiore ai 45° (50% di escursione del pedale), mentre tutti gli intervalli di tempo in cui si registrava una decelerazione della pressione esercitata sul pedale del freno, corrispondono ora a quegli intervalli in cui l'inclinazione è inferiore ai 45°.

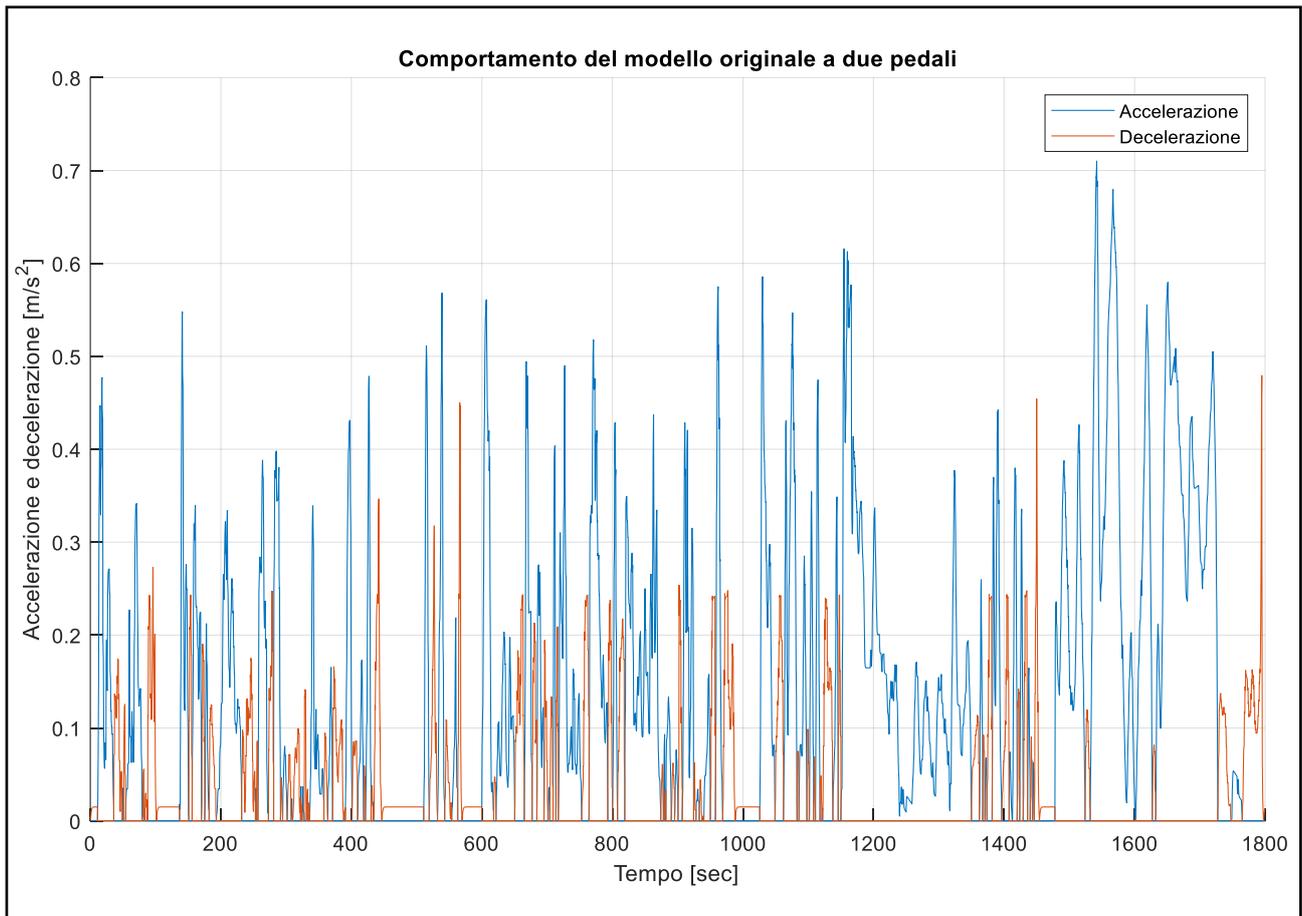


Figura 36 – Andamento classico di acceleratore e freno

Per la determinazione del coefficiente rigenerativo relativo alla decelerazione, è stata creata una lookup table apposita, rappresentata in Tabella 13, nella quale all'aumentare della pendenza del pedale (curva rossa in Figura 36) aumenta linearmente anche il modulo del coefficiente rigenerativo, fino a raggiungere un valore unitario in corrispondenza della massima pendenza del pedale (ovvero completamente rilasciato in logica e-Pedal). Al contrario, per quegli intervalli di tempo nei quali il pedale non viene utilizzato (ad esempio in

fase di accelerazione), esso mantiene costantemente un valore nullo, e corrispondentemente il valore del coefficiente rigenerativo rimane nullo.

Pendenza	0	0,25	5	0,75	1
Coefficiente rigenerativo	0	0,25	5	0,75	1

Tabella 13 – Lookup table della decelerazione

Grazie a questa logica, si intuisce come possa lavorare il sistema e-Pedal: per valori molto bassi della propria inclinazione (corrispondenti a picchi della curva rossa del freno tradizionale), la richiesta di decelerazione si amplifica, incrementando l'effetto della frenata rigenerativa. Se poi questa decelerazione così elaborata non dovesse risultare sufficiente, si ricorda che il pedale classico del freno potrà essere utilizzato ogniqualvolta lo si desidera, per fornire ulteriore coppia frenante, anche in modalità e-Pedal.

6.4.6 – Descrizione dei guadagni (gain)

Le logiche adottate per definire i coefficienti rigenerativi appena illustrati, generano talvolta dei valori di output troppo bassi, che rendono il coefficiente globale della rigenerazione troppo piccolo in modulo, con un massimo intorno allo 0,4, non garantendo un'intensità della coppia frenante rigenerativa tale da effettuare correttamente la decelerazione richiesta dal conducente, richiedendo di conseguenza l'utilizzo del freno classico dissipativo, per un lasso di tempo eccessivo.

Per questo motivo, le lookup table relative al terzo ed al quarto coefficiente rigenerativo vengono affiancate da un coefficiente moltiplicativo (gain), il quale incrementa il valore di output elaborato dalla lookup table alla quale è collegato, di una quantità pari al valore del numero riportato al suo interno, definito in fase di modellazione della logica del sistema dell'e-Pedal, e riportato in Figura 37.

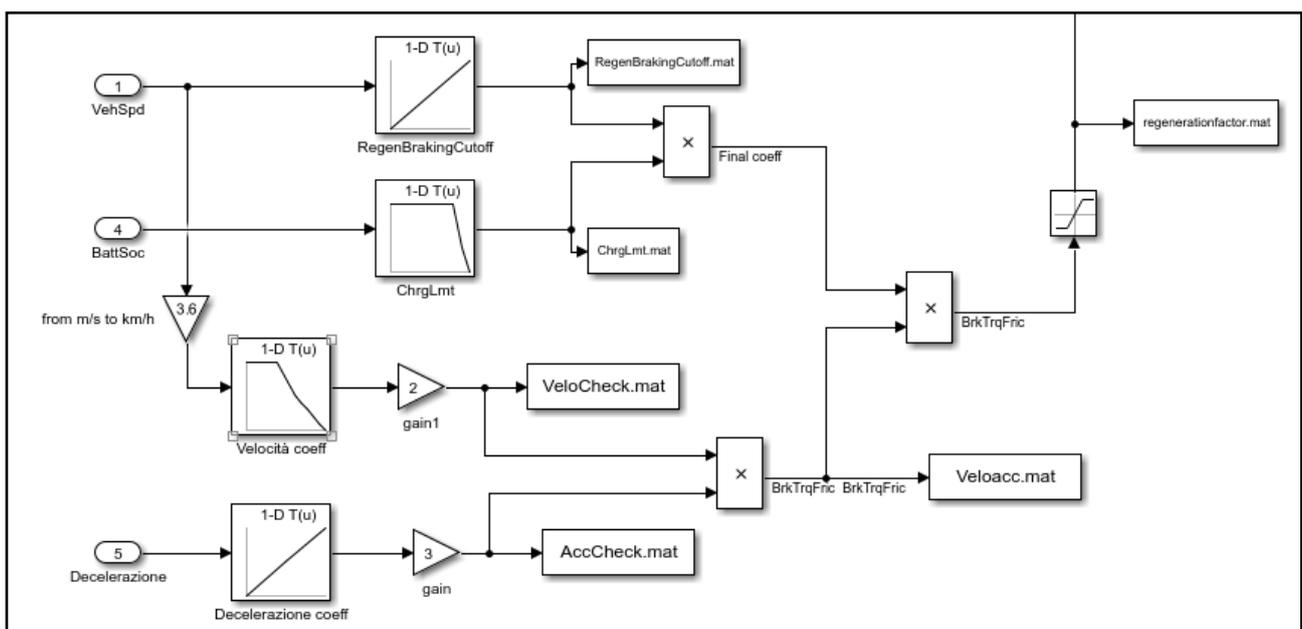


Figura 37 – Lookup table della logica dell'e-Pedal

In particolare, come si può notare dall'immagine qui riportata, il valore del gain relativo alla lookup table della velocità è pari a 2, mentre il valore del gain relativo alla lookup table della decelerazione è pari a 3; rispettivamente in riferimento al terzo ed al quarto coefficiente rigenerativo. Questi gain consentono di incrementare il valore del coefficiente rigenerativo, ottenendo infine un andamento come mostrato in Figura 38 per il terzo coefficiente relativo alla velocità, ed in Figura 39 in riferimento al quarto coefficiente relativo alla decelerazione, in

modo da incrementare successivamente il valore del coefficiente globale di rigenerazione, per avere una maggiore percentuale di energia recuperata.

Per ovviare alla possibilità di avere un coefficiente globale di rigenerazione superiore ad uno (fisicamente irrealizzabile), è stato inserito anche un saturatore a seguito della determinazione di tale coefficiente, in modo da mantenerlo entro i limiti consentiti: pari ad uno come limite superiore (con rigenerazione totale, nonché caso ideale), e pari a zero come limite inferiore (rigenerazione nulla).

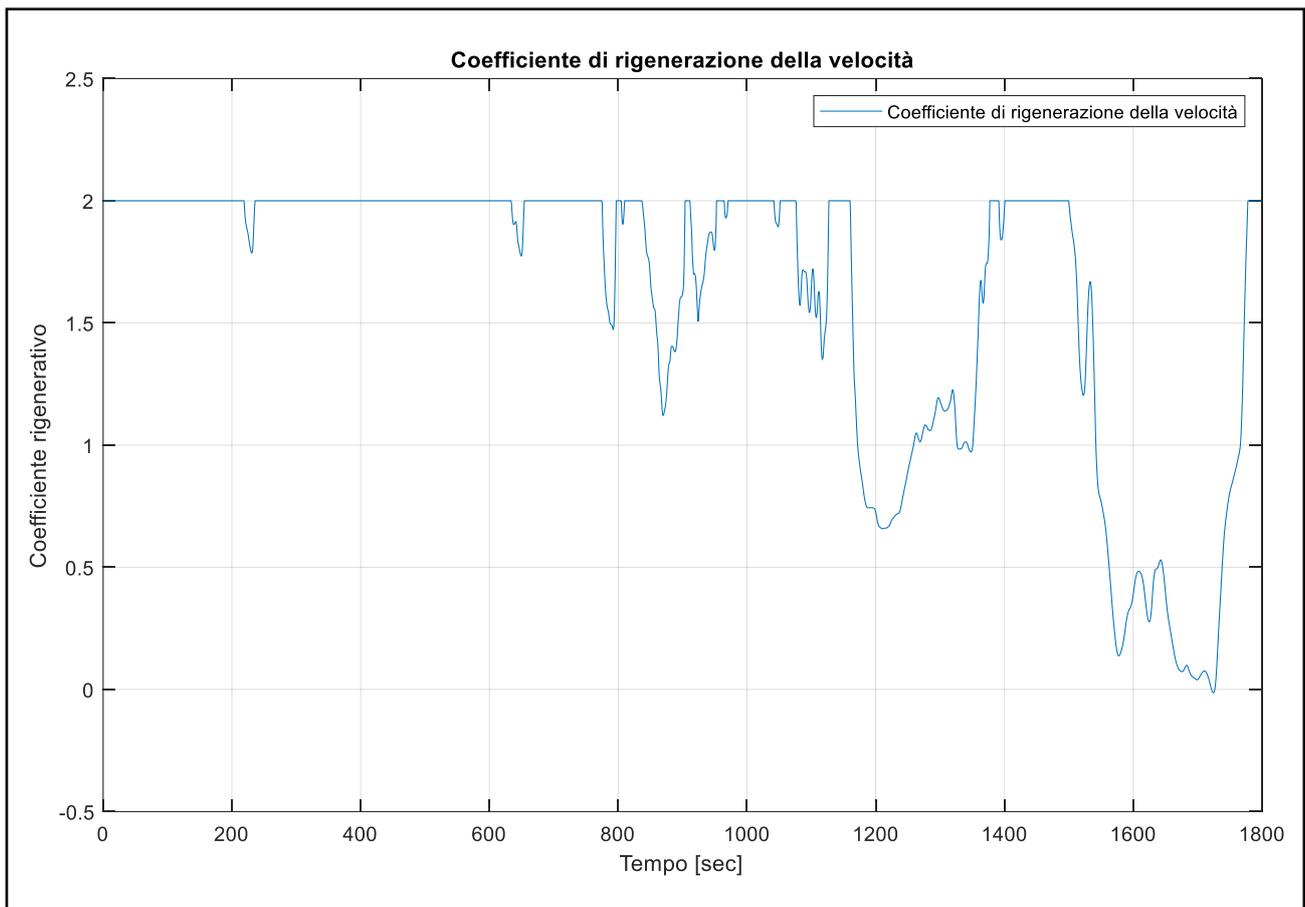


Figura 38 – Coefficiente rigenerativo della velocità con gain pari a 2

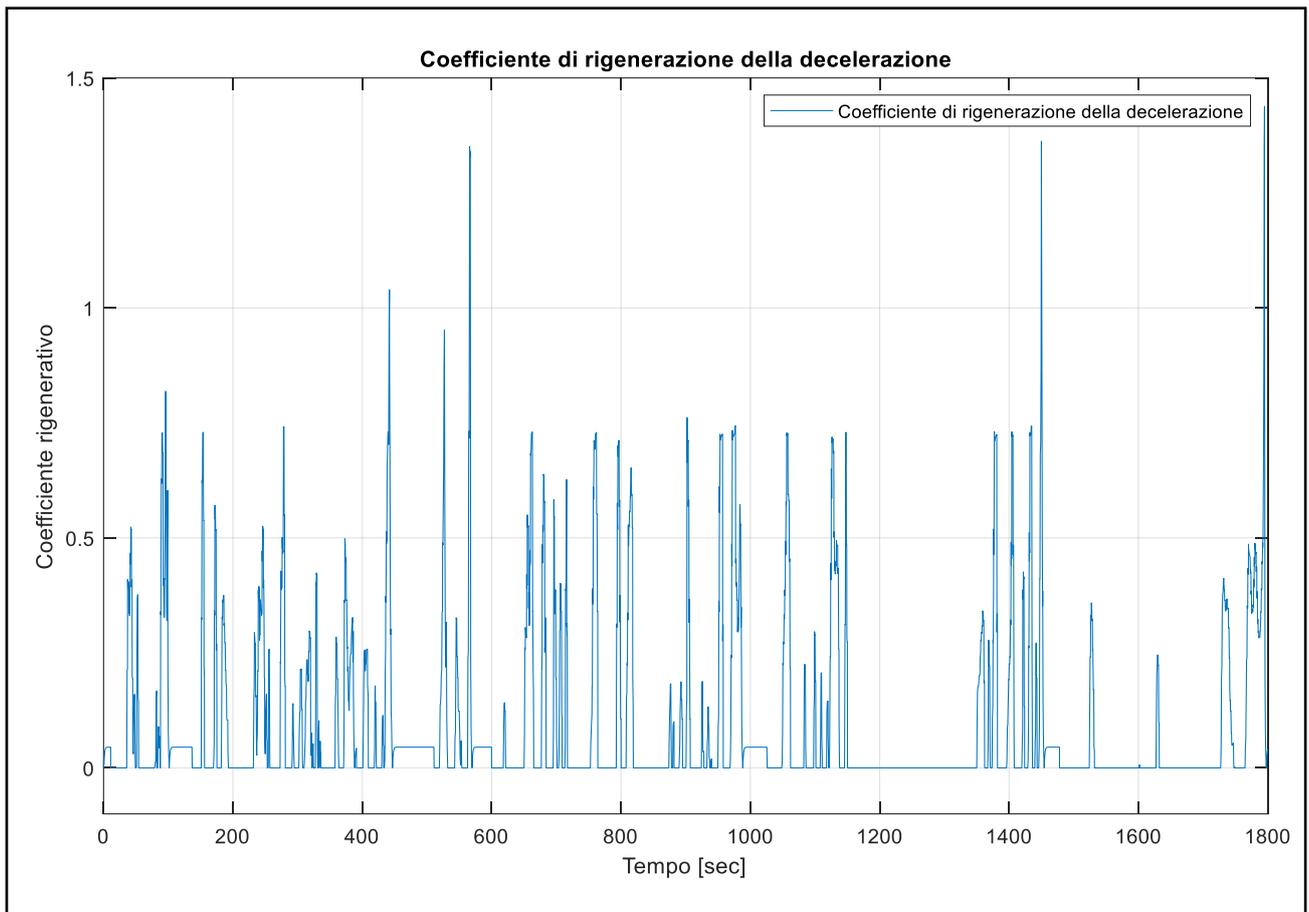


Figura 39 – Coefficiente rigenerativo della decelerazione con gain pari a 3

6.4.7 – Determinazione del coefficiente globale di rigenerazione

Una volta determinati i singoli coefficienti di rigenerazione (quattro in totale), si calcola il coefficiente globale di rigenerazione come prodotto dei singoli coefficienti,

$$Coeff_{Globale} = Coeff_{ON/OFF} * Coeff_{SOC} * Coeff_{Velocità} * Coeff_{Decelerazione}$$

Questo coefficiente andrà a moltiplicare la massima coppia estraibile in fase di frenata rigenerativa, in maniera tale da valutare la coppia che effettivamente sarà possibile recuperare, ripristinando parte dello state of charge del veicolo.

L'ipotesi progettuale che sta alla base della logica dell'e-Pedal, con la quale viene elaborato il coefficiente globale di rigenerazione, prevedere un livello di intensità della frenata rigenerativa tanto più elevato, quanto più il valore del coefficiente di rigenerazione globale si avvicina ad uno, il che corrisponde ad una richiesta di decelerazione decisa e vigorosa da parte del conducente. Al contrario, per un valore del coefficiente globale di rigenerazione prossimo allo zero, si adotterà un'intensità della frenata rigenerativa molto bassa, corrispondente ad una decelerazione lieve, appena percettibile.

Per ovviare a problemi legati al modulo di questo coefficiente, in seguito alla sua valutazione, nel modello Simulink è stato inserito anche un saturatore, che lo limita superiormente ad uno ed inferiormente a zero, in modo tale da non avere un coefficiente globale superiore ad uno, onde evitare che il sistema riceva in ingresso un'informazione errata relativa alla coppia rigeneratrice da utilizzare per la rigenerazione (superiore a quella massima consentita). L'andamento del coefficiente globale di rigenerazione analizzato per un ciclo WLTP è visibile in Figura 40.

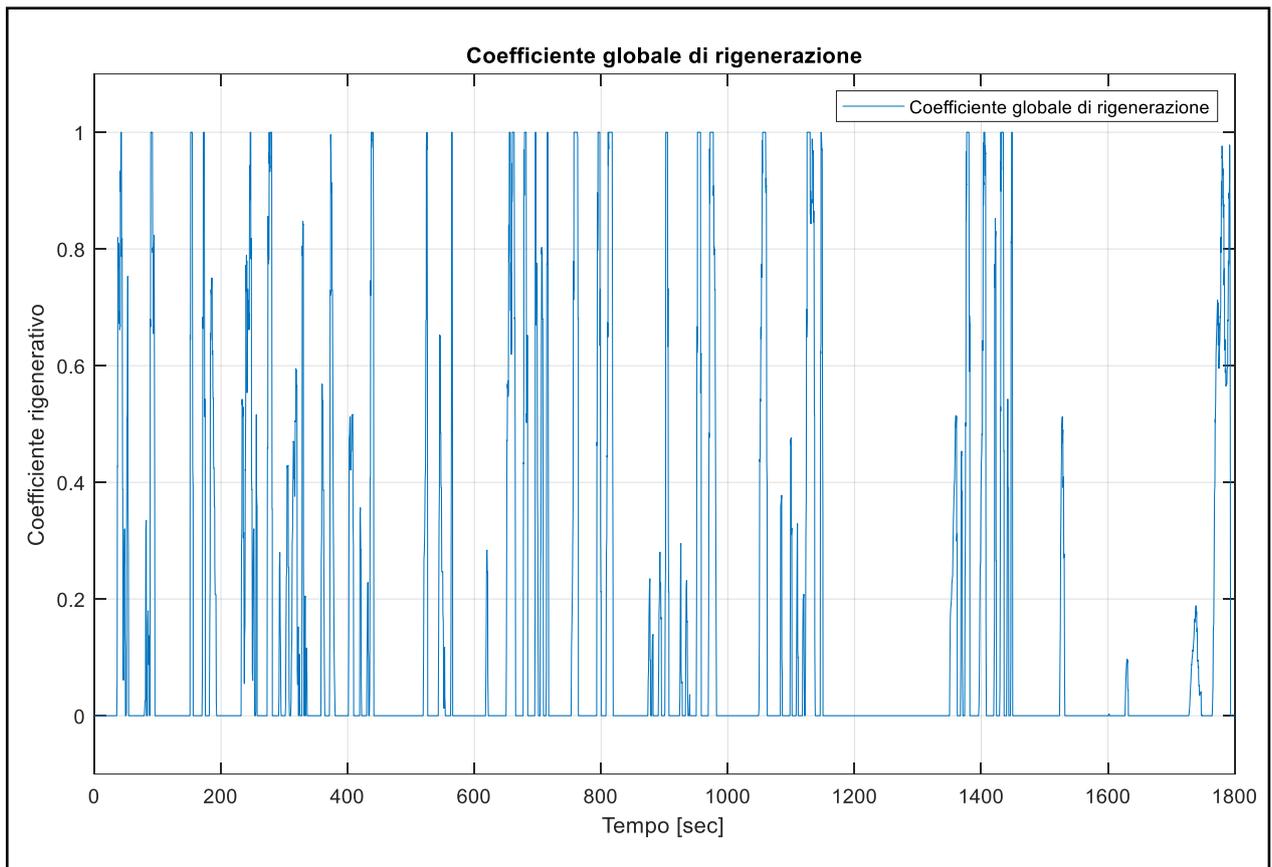


Figura 40 – Coefficiente globale di rigenerazione

6.4.8 – Definizione del coefficiente di limitazione della frenata rigenerativa

Viene ora analizzato l'effetto del coefficiente moltiplicativo della coppia rigeneratrice evidenziato in Figura 41, per valutare l'impatto che esso ha sullo state of charge del veicolo e sull'autonomia.

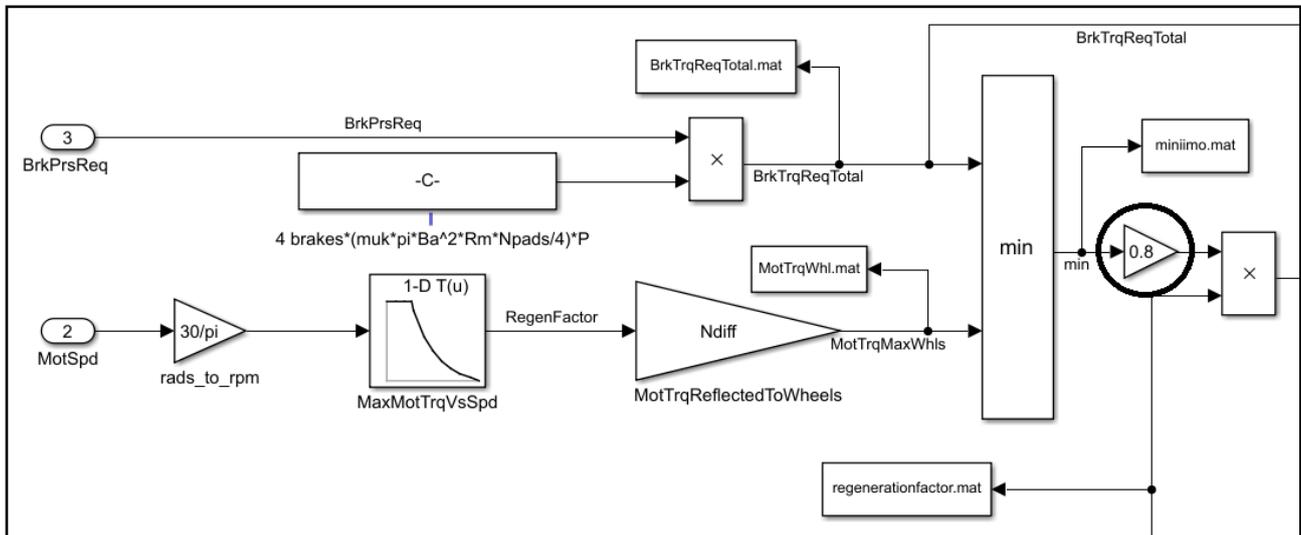


Figura 41 – Identificazione del coefficiente rigenerativo nel blockset Controllers

In particolare, viene mostrato inizialmente lo state of charge che si ottiene da una simulazione della Nissan Leaf e+, senza la logica dell'e-Pedal implementata, corrispondente alla condizione iniziale del modello, seguita da una seconda simulazione, in cui l'unica differenza rispetto alla prima riguarda l'assenza della frenata rigenerativa.

Nello specifico, per la prima prova, riportata in Figura 42 si rileva il raggiungimento del valore pari al 2% dello state of charge dopo 30383 secondi (circa otto ore e mezza), con una corrispondente distanza percorsa pari a 392,45 km.

Per la seconda prova priva di frenata rigenerativa, si registra invece il raggiungimento del valore pari al 2% dello state of charge dopo 24.264 secondi (meno di sette ore), con una corrispondente distanza percorsa pari a 313,41 km, come mostrato in Figura 43.

Dai risultati ottenuti, si evince come la frenata rigenerativa giochi un ruolo fondamentale nella determinazione dell'autonomia del veicolo, dato che per il medesimo percorso, in condizioni ottimali è possibile raggiungere i 392,45 km di autonomia, mentre senza di essa l'autonomia diminuisce di ben 79,04 km. Per questo motivo, in prima analisi è stato fissato il coefficiente moltiplicativo della massima coppia rigeneratrice a 0,8, per approssimare le perdite presenti.

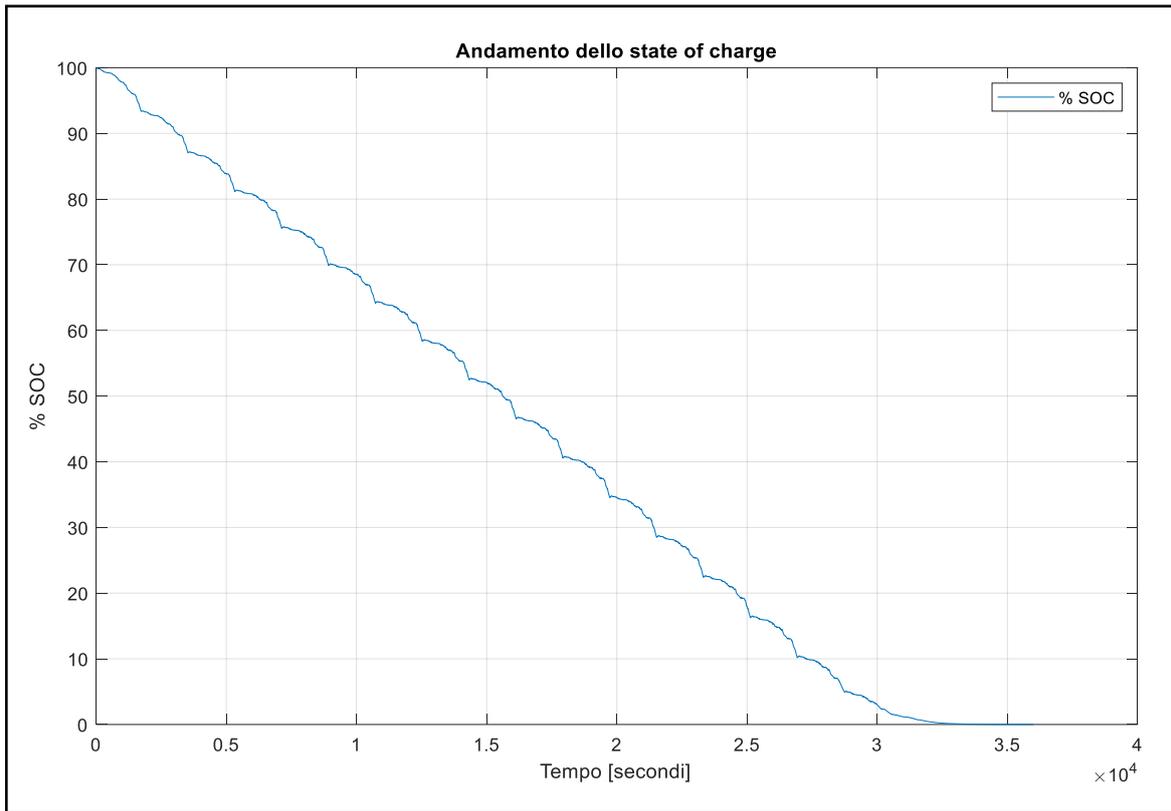


Figura 42 – Andamento dello state of charge con la frenata rigenerativa

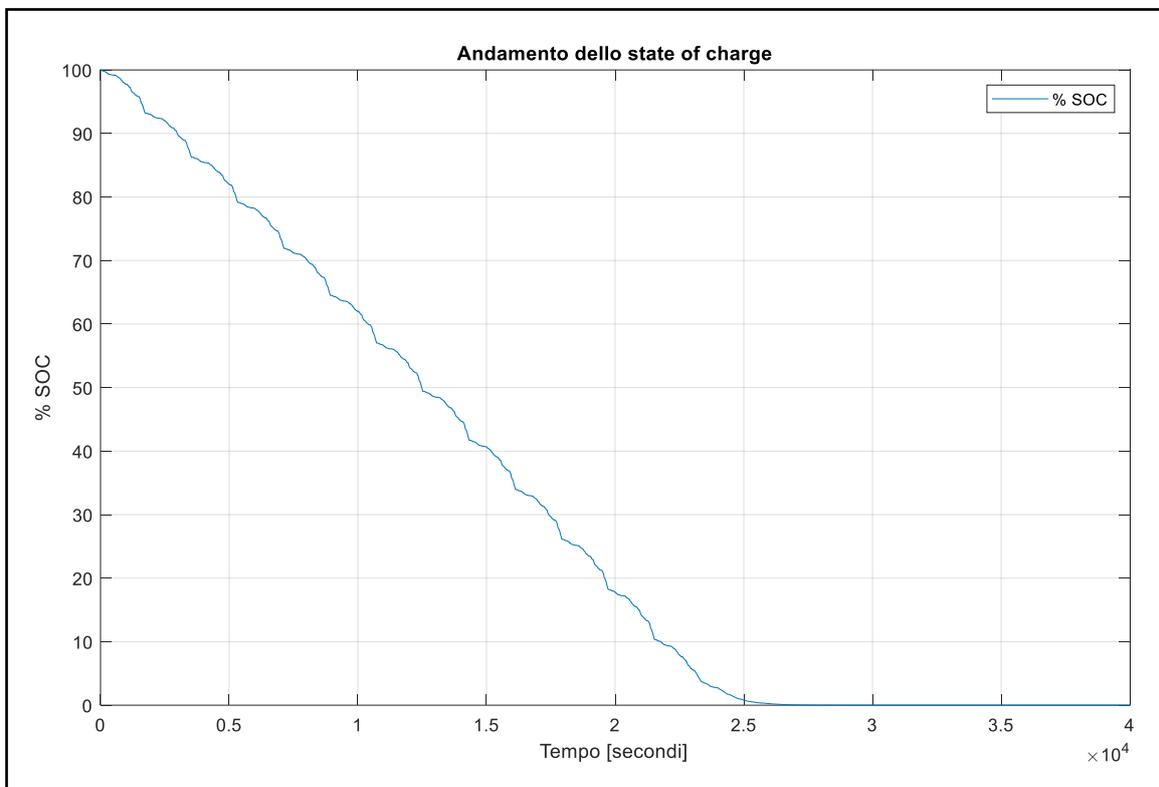


Figura 43 – Andamento dello state of charge senza la frenata rigenerativa

7 – Risultati sulla Nissan Leaf e+ con logica e-Pedal

In seguito all'implementazione della logica del sistema e-Pedal, al cui interno sono comprese anche le lookup table appena presentate, si rileva un livello dello state of charge pari al 2% dopo aver percorso 384,18 km, a fronte dei 381,33 km percorsi senza l'utilizzo di tale logica. Tale risultato è il frutto della prova 5, presentata nel seguito, nella quale viene implementata la logica dell'e-Pedal, vengono aggiornate le lookup table ed i coefficienti di rigenerazione, e viene sfruttata tutta la coppia rigeneratrice in fase di frenata.

Nel seguito verranno presentati sei diversi casi di studio, ognuno dei quali con caratteristiche diverse riguardo l'attivazione o meno della logica dell'e-Pedal, la presenza o meno del freno tradizionale dissipativo, e l'intensità della coppia rigeneratrice effettiva. Questo, per evidenziare le differenze tra i nuovi casi studiati e quelli originali. Ognuno di questi casi è stato analizzato per una durata complessiva pari a 20 ciclo WLTP, che corrispondono a dieci ore esatte di monitoraggio continuo del veicolo, pari a 36.000 secondi.

-	Logica e-Pedal	Freno dissipativo	Rendimento
Prova 1	NO	SI	0,8
Prova 2	NO	NO	0,8
Prova 3	SI	SI	0,8
Prova 4	SI	NO	0,8
Prova 5	SI	SI	1
Prova 6	SI	NO	1

Tabella 14 - Casistiche analizzate

Nello specifico, il primo test fornirà una descrizione dettagliata delle variabili chiave del modello, e che non verrà ripetuta per i casi successivi. Nelle successive analisi verranno semplicemente effettuati dei confronti tra le stesse variabili ma in casistiche diverse, per spiegare cosa sia cambiato, come, e quali parametri abbiano influenzato questa variazione, per poi chiudere con delle conclusioni riguardo la prova stessa, indicando i punti a favore ed i punti a sfavore, giustificandoli, per una chiara comprensione delle simulazioni effettuate e della logica del nuovo sistema implementato.

7.1 – Prova 1

Il primo test mira a comprendere le prestazioni della Nissan Leaf e+ attraverso l'analisi dei risultati derivanti dalla simulazione del modello originale in modello Simulink, effettuate con una logica che non prevede l'implementazione del sistema e-Pedal (quindi una vettura elettrica tradizionale con due pedali, uno adibito all'accelerazione ed il secondo al freno), con la possibilità di utilizzare il freno dissipativo tradizionale in caso di necessità, e con un coefficiente moltiplicativo della coppia rigeneratrice pari a 0,8, che approssima tutte le normali perdite che potrebbero verificarsi durante l'esecuzione del ciclo WLTP: sia per delle perdite energetiche della vettura, che alle componenti interne della batteria quali le resistenze interne, sia per fattori legati agli agenti atmosferici, e altri ancora.

Si analizza in sintesi, lo stesso modello della Nissan Leaf e+ esaminato durante la fase di validazione del modello, ma con l'aggiunto del coefficiente moltiplicativo della coppia rigeneratrice pari a 0,8, per poi confrontare i risultati e gli andamenti delle variabili significative quali velocità, coppia rigeneratrice e state of charge, con le altre Prove presenti in Tabella 14.

7.1.1 – Analisi del profilo di velocità

Di seguito, in Figura 44, viene visualizzato il grafico che mette a confronto la velocità del ciclo WLTP che il veicolo dovrebbe mantenere durante tutta la durata del percorso (curva blu), e la velocità di feedback del veicolo (curva rossa), ovvero la velocità che il modello simulato riesce a seguire in base agli input forniti. L'obiettivo è quello di verificare che gli andamenti dei due grafici siano sovrapposti, ovvero che la funzione che definisce la velocità di feedback sia sovrapposta alla funzione che descrive la velocità del ciclo WLTP, in modo da poter affermare che il modello del veicolo creato in ambiente Simulink riesca a seguire il percorso prefissato, confermando la corretta funzionalità della nuova logica del sistema e-Pedal implementato.

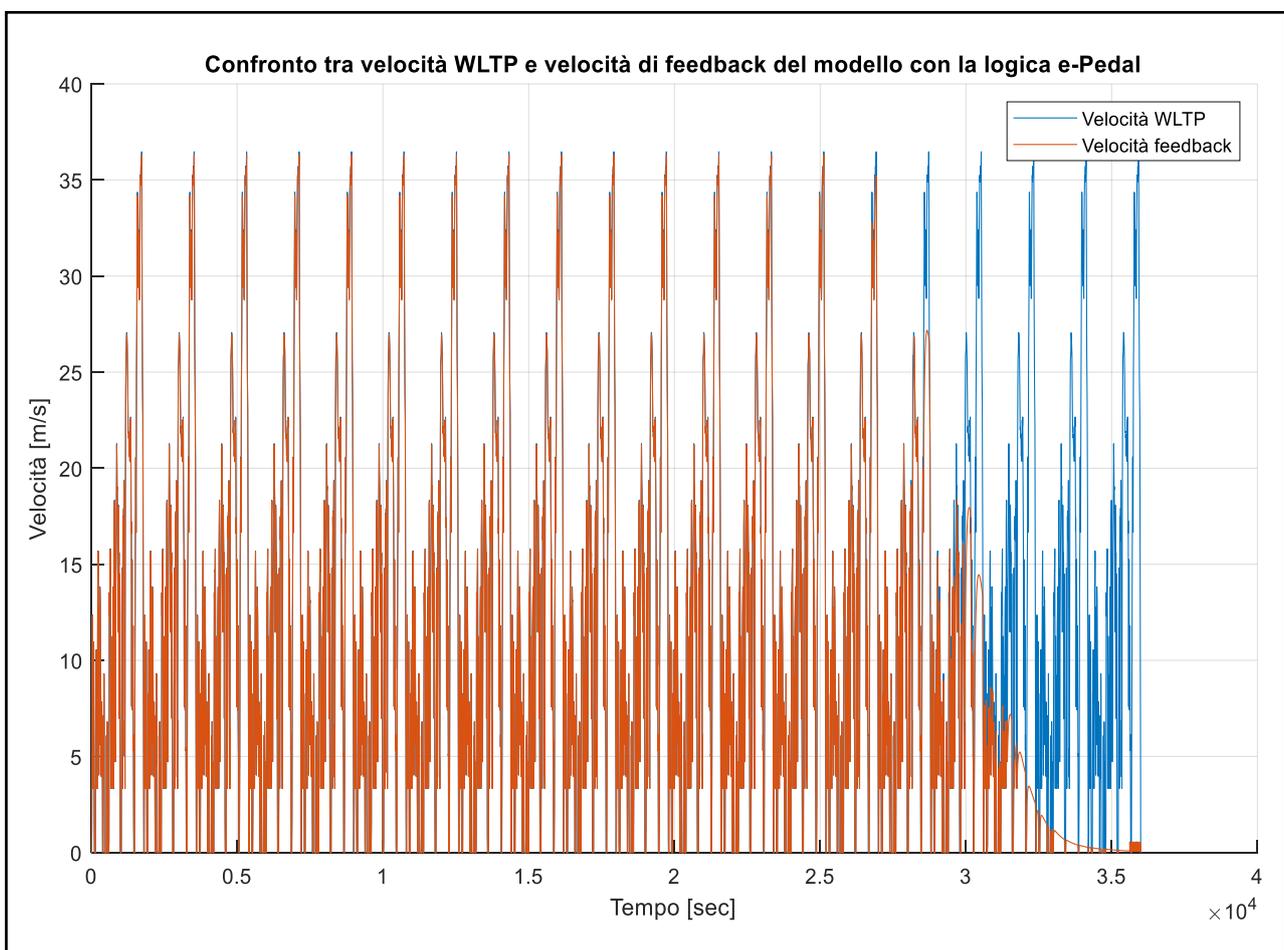


Figura 44 – Andamento dei profili della velocità WLTP e del modello simulato

Dal confronto tra queste due funzioni, entrambe relative al parametro della velocità, si nota che generalmente, il profilo simulato dal modello riesce a seguire fedelmente il ciclo di riferimento, mentre nella fase finale, ovvero dopo circa otto ore continue di viaggio e senza effettuare alcuna ricarica via cavo, la velocità di feedback del veicolo inizia a non seguire

più l'andamento prestabilito del ciclo WLTP, a causa del basso valore dello state of charge rimanente, che si attesta attorno al 5%. Questo perché la poca carica residua non è più sufficiente ad erogare la giusta quantità di coppia richiesta dal veicolo per raggiungere i picchi di velocità locali, limitandosi quindi a raggiungere delle velocità effettive inferiori a quelle dichiarate dalla norma, con un progressivo decadimento della velocità stessa di feedback, come mostrato in Figura 45, fino a raggiungere una velocità nulla (per esaurimento completo della carica della batteria).

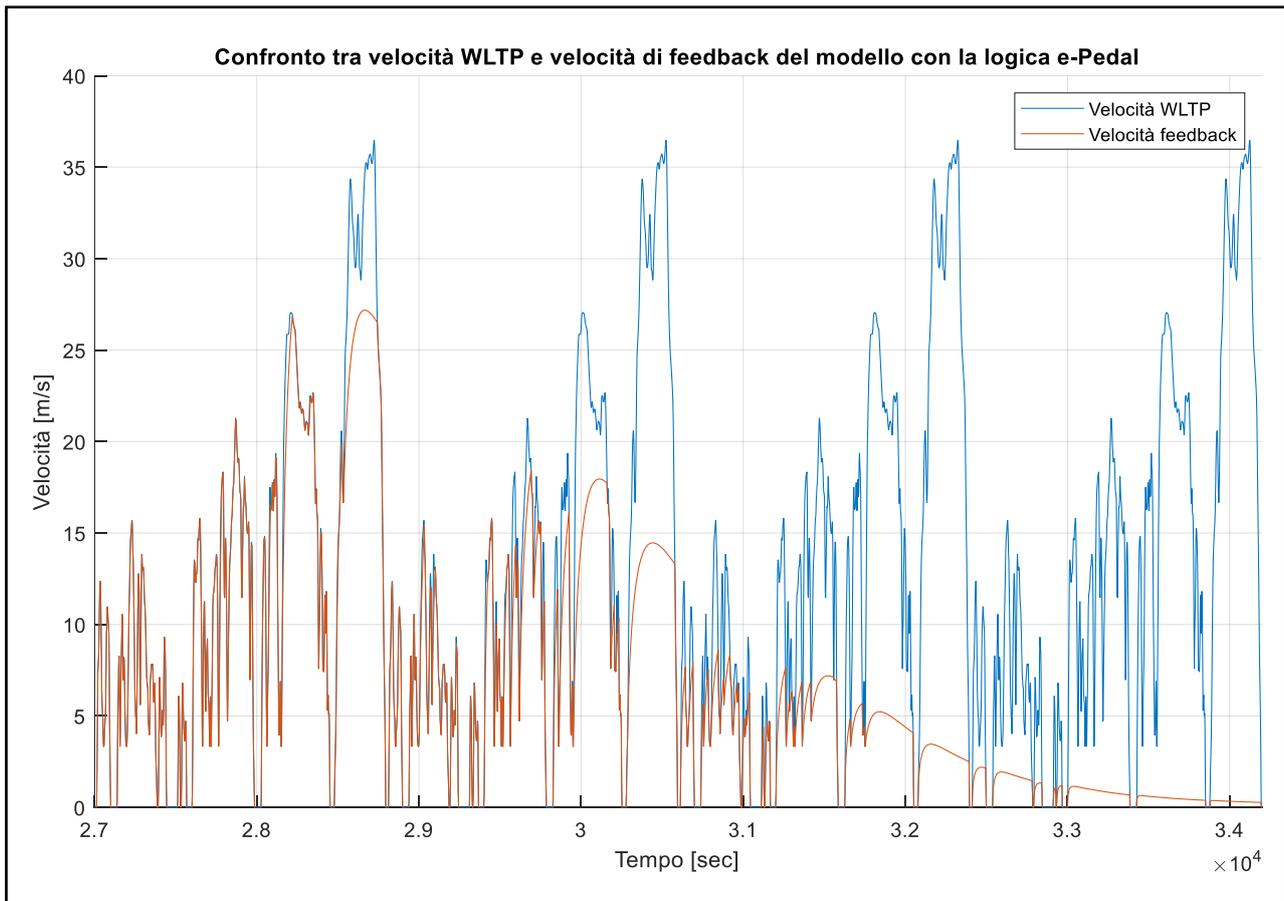


Figura 45 – Andamento dei profili di velocità per gli ultimi cicli del percorso

Inoltre, l'inizio dell'anomalia si può riscontrare anche sul grafico dello state of charge riportato più avanti in Figura 64, a partire dallo stesso istante temporale in cui si verifica l'inizio dell'anomalia per la curva della velocità, in cui non si presenta più la ripetizione ciclica dell'andamento della carica residua osservata fino a quel momento.

7.1.2 – Richiesta di accelerazione e frenata

Si analizzano ora le richieste di coppia motrice e di coppia frenante, derivanti dall'elaborazione dei parametri di ingresso della velocità WLTP e della velocità di feedback.

In Figura 46 viene mostrato l'andamento delle coppie richieste da parte del conducente per tutta la durata del percorso, pari a 20 cicli WLTP: in blu viene rappresentato l'andamento della coppia motrice, in funzione della percentuale di inclinazione del pedale nella fase di accelerazione, mentre in rosso viene rappresentato l'andamento della coppia frenante, che verrà in parte recuperata e in parte dissipata per attrito, nel caso in cui non fosse sufficiente la sola coppia frenante fornita dalla ricarica rigenerativa.

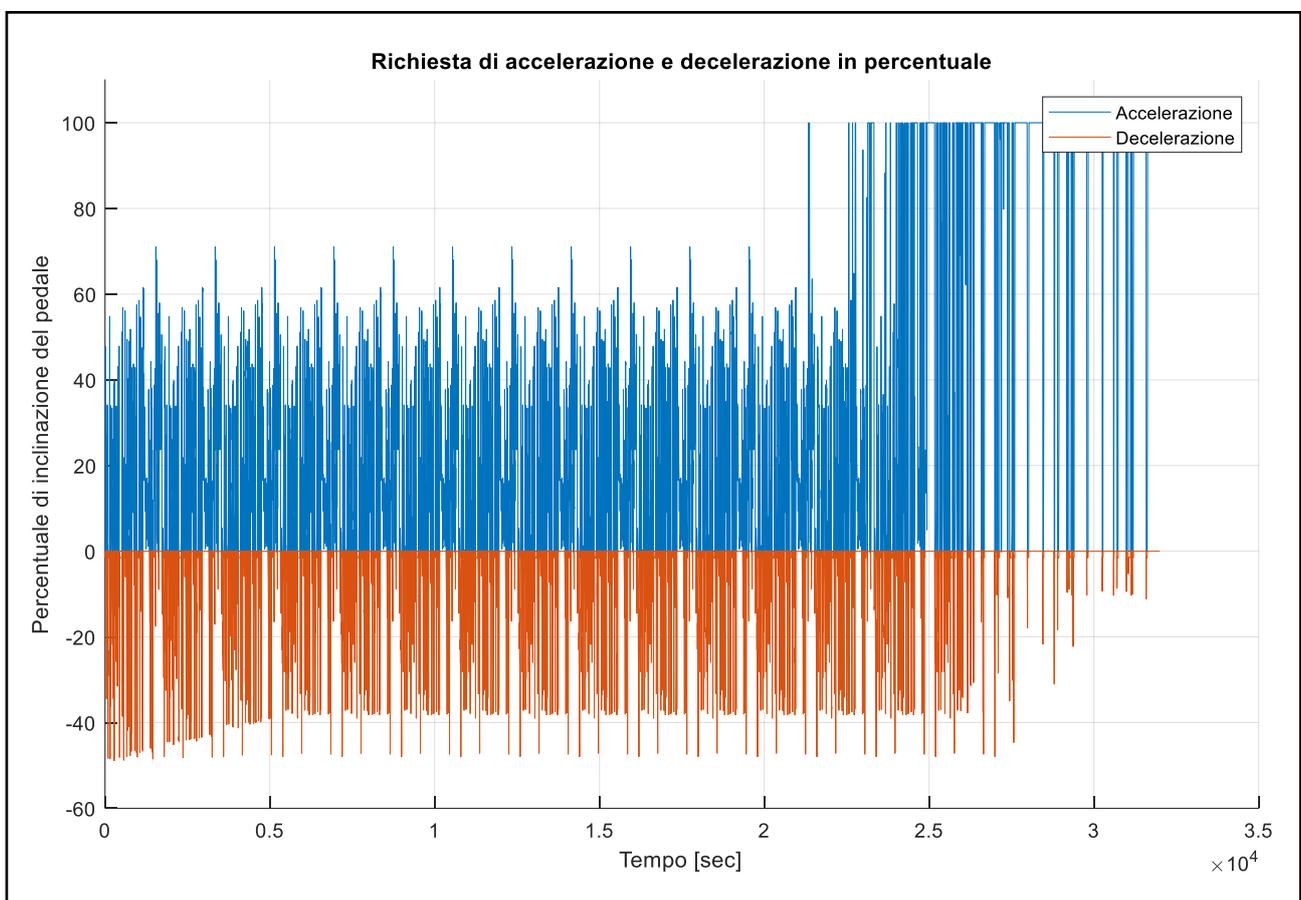


Figura 46 - Richiesta di accelerazione e decelerazione per il percorso completo

Nello specifico, in Figura 47 viene mostrato l'andamento delle curve relativa alla richiesta di coppia motrice e di coppia frenante per il decimo ciclo WLTP, nel quale si è raggiunta la condizione di regime, e non vi sono componenti che registrano un andamento anomalo rispetto al resto del ciclo, come invece avviene nei primi e negli ultimi cicli del percorso globale.

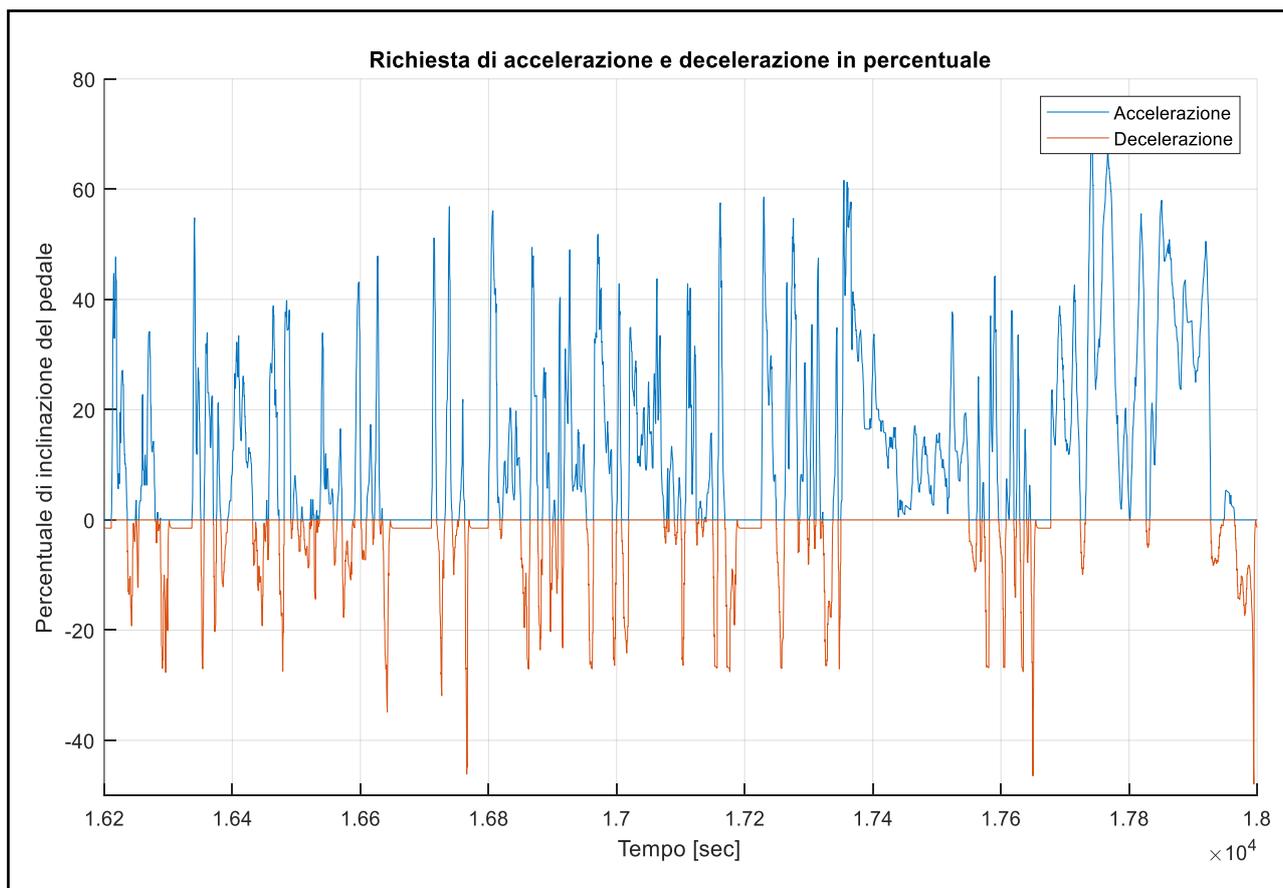


Figura 47 – Richiesta di accelerazione e decelerazione per il decimo ciclo WLTP

I grafici appena esposti mostrano le richieste di coppia motrice e di coppia frenante richieste dal conducente nel caso di veicolo con due pedali distinti di acceleratore e freno. Questi segnali, per il sistema monopedalico dell'e-Pedal, vengono convertiti secondo una proporzione, in modo da ottenere un profilo di funzionamento del pedale che oscilli virtualmente tra gli 0° ed i 90°, ovvero tra lo 0% ed il 100% dell'escursione massima consentita, in cui lo zero corrisponde ad una condizione di rilascio totale del pedale, mentre la posizione corrispondente al 100% di escursione del pedale corrisponde ad una accelerazione massima. Tale profilo viene dunque riportato in Figura 48, riferendosi al decimo ciclo WLTP appena presentato, mentre in Figura 49 viene mostrato il profilo generale del comportamento dell'e-Pedal per tutto il percorso con durata pari a 20 cicli WLTP.

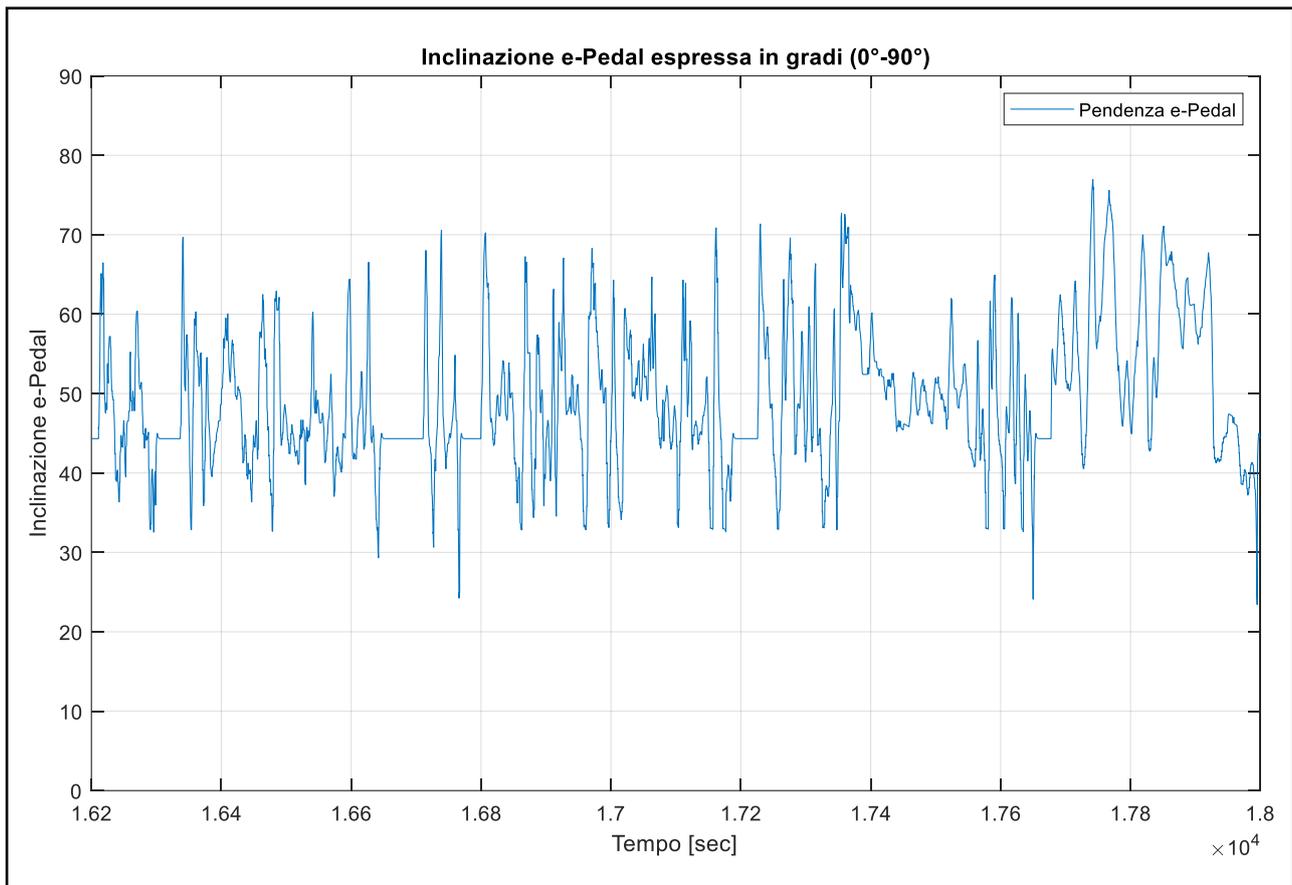


Figura 48 – Comportamento dell'e-Pedal nel decimo ciclo WLTP

Il grafico di Figura 48 mostra come il valore medio della pendenza dell'e-Pedal sia pari a 45° (50% di escursione), che corrisponde alla posizione virtualmente neutra del pedale, in cui non si ha né accelerazione né frenata.

Per essere precisi, gli intervalli in cui si ha un mantenimento prolungato nel tempo del livello di inclinazione dell'e-Pedal pari a 45°, corrispondono a quegli intervalli di tempo in cui il veicolo è fermo, in fase di arresto, a cui dovrebbe invece corrispondere un valore virtuale dell'inclinazione del pedale pari a 0°, ovvero 10% di escursione. Tuttavia, il grafico qui rappresentato non è errato, dato che ai suddetti intervalli non corrisponde nessuna accelerazione o decelerazione, e lo si può considerare valido.

Quanto appena esposto, lo possiamo ritrovare anche in Figura 49, in cui si nota come l'andamento dell'inclinazione che l'e-Pedal assume nei primi e negli ultimi cicli WLTP differisca dall'andamento che manifesta una volta raggiunta la condizione di regime (zona centrale dell'immagine), nella quale i valori di picco si ripetono ciclicamente. Questa differenza deriva dal fatto che nelle prime fasi del percorso (nei primi quattro cicli WLTP) lo

state of charge del veicolo risulta ancora troppo elevato (vicino al 100% o poco meno) per consentire una decelerazione ad opera della sola frenata rigenerativa, per cui viene in primo luogo richiesto un maggiore apporto di coppia frenante, ed in secondo luogo, dove la frenata rigenerativa non riesce a soddisfare la decelerazione richiesta dal conducente, la restante parte della coppia frenante richiesta, viene fornita dalla frenata dissipativa per mezzo del freno tradizionale che agisce per attrito (che il conducente dovrà pigiare per decelerare ulteriormente). Nello specifico, i primissimi istanti del percorso, per i quali lo state of charge è massimo e pari al 100%, secondo la relativa lookup table presente in Tabella 8, l'intensità della frenata rigenerativa è nulla, ed infatti viene inoltrata una richiesta di coppia frenante massima, dato che essa non viene soddisfatta dalla frenata rigenerativa, ma solo da quella classica dissipativa.

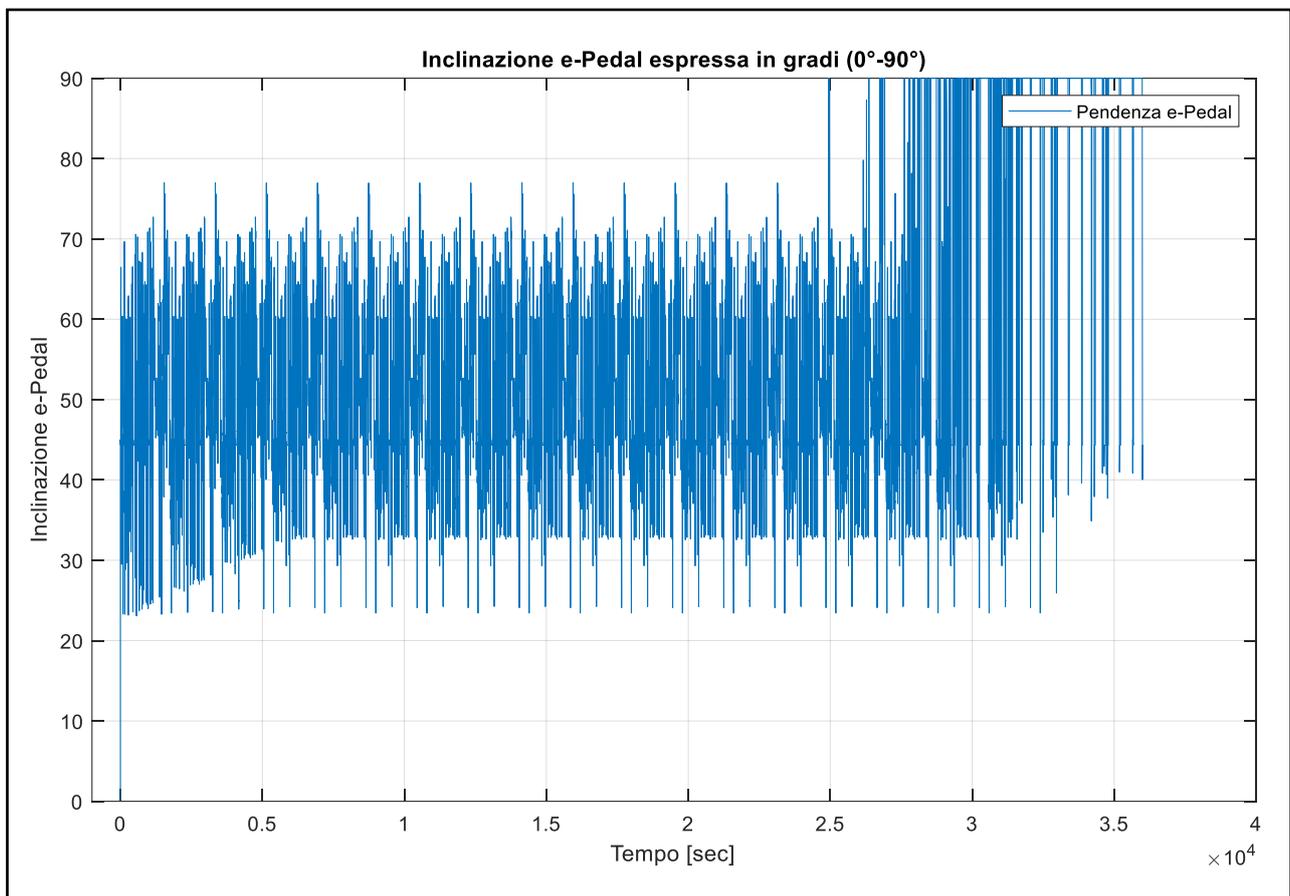


Figura 49 – Comportamento dell'e-Pedal per tutto il percorso

Similmente, lo stesso ragionamento viene effettuato anche nelle fasi finali del percorso, in cui il livello dello state of charge è troppo basso per soddisfare la richiesta di coppia motrice inoltrata dal conducente, e conseguentemente la velocità del veicolo non riesce a raggiungere

i valori di picco previsti dal ciclo WLTP, generando quindi un segnale di feedback che esprime la richiesta di ulteriore coppia motrice, ma che la batteria non può più soddisfare, perché ha ormai esaurito la carica residua. Questo ragionamento viene poi ripetuto per diversi cicli al termine del percorso, dato che la frenata rigenerativa ripristina sempre una piccola parte dello state of charge della batteria, la quale genera questa reazione a catena appena descritta.

7.1.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice

Una volta definito il comportamento del sistema e-Pedal, e di come esso impartisca le richieste di accelerazione e decelerazione, si analizzano le coppie in gioco, ed in particolare si analizza la coppia frenante richiesta dal conducente durante la fase di decelerazione, e la coppia rigeneratrice che effettivamente può sfruttata per ripristinare parte della carica residua, come mostrato in Figura 50.

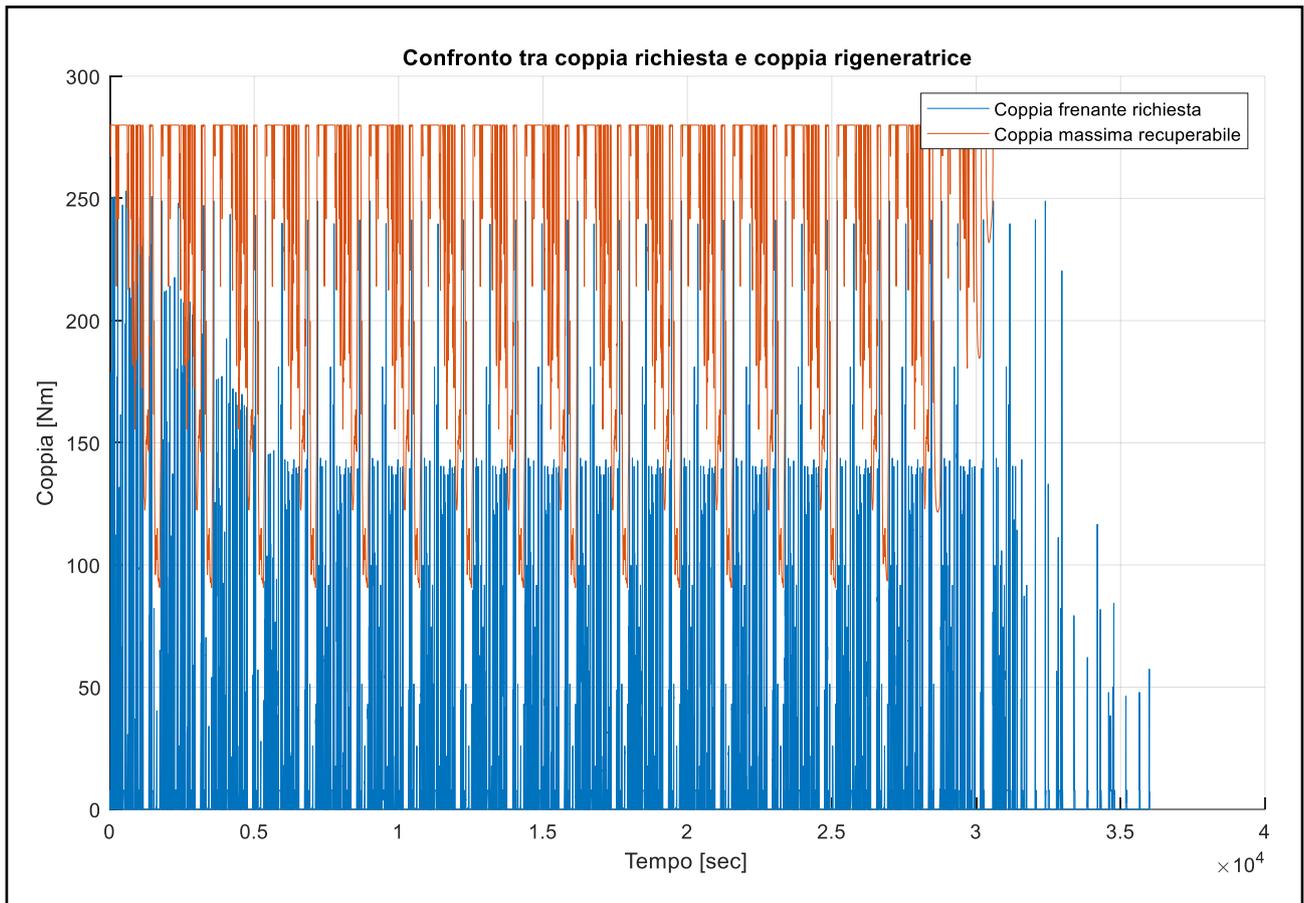


Figura 50 - Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice

Così come analizzato per le variabili precedenti, anche in questo caso, le due variabili esaminate mostrano un comportamento differente tra le fasi iniziali, le fasi in cui si è raggiunta la condizione di regime, e i cicli finali, con andamento decrescente della richiesta di coppia frenante da parte del conducente, per entrambi gli estremi del percorso.

Nello specifico, nei primi cicli WLTP la richiesta di coppia frenante decresce, in quanto per altri valori dello state of charge, la lookup table corrispondente elabora un coefficiente

rigenerativo basso, prossimo allo 0,1, che non consente di rigenerare in fase di decelerazione, mantenendo elevata la richiesta di coppia frenante.

Dopo i primi cicli, la richiesta di coppia frenante prosegue in maniera ciclica e con gli stessi valori di picco e di valle in modulo, sino agli ultimi cicli del percorso, dove per valori di state of charge bassi la coppia richiesta è minore rispetto al normale, dato che la vettura, non essendo in grado di raggiungere velocità elevate, non necessita di elevate coppie frenanti.

Per comprendere meglio l'andamento delle due funzioni nel tempo, viene riportato l'andamento delle due curve in Figura 51, per un solo ciclo WLTP, il decimo.

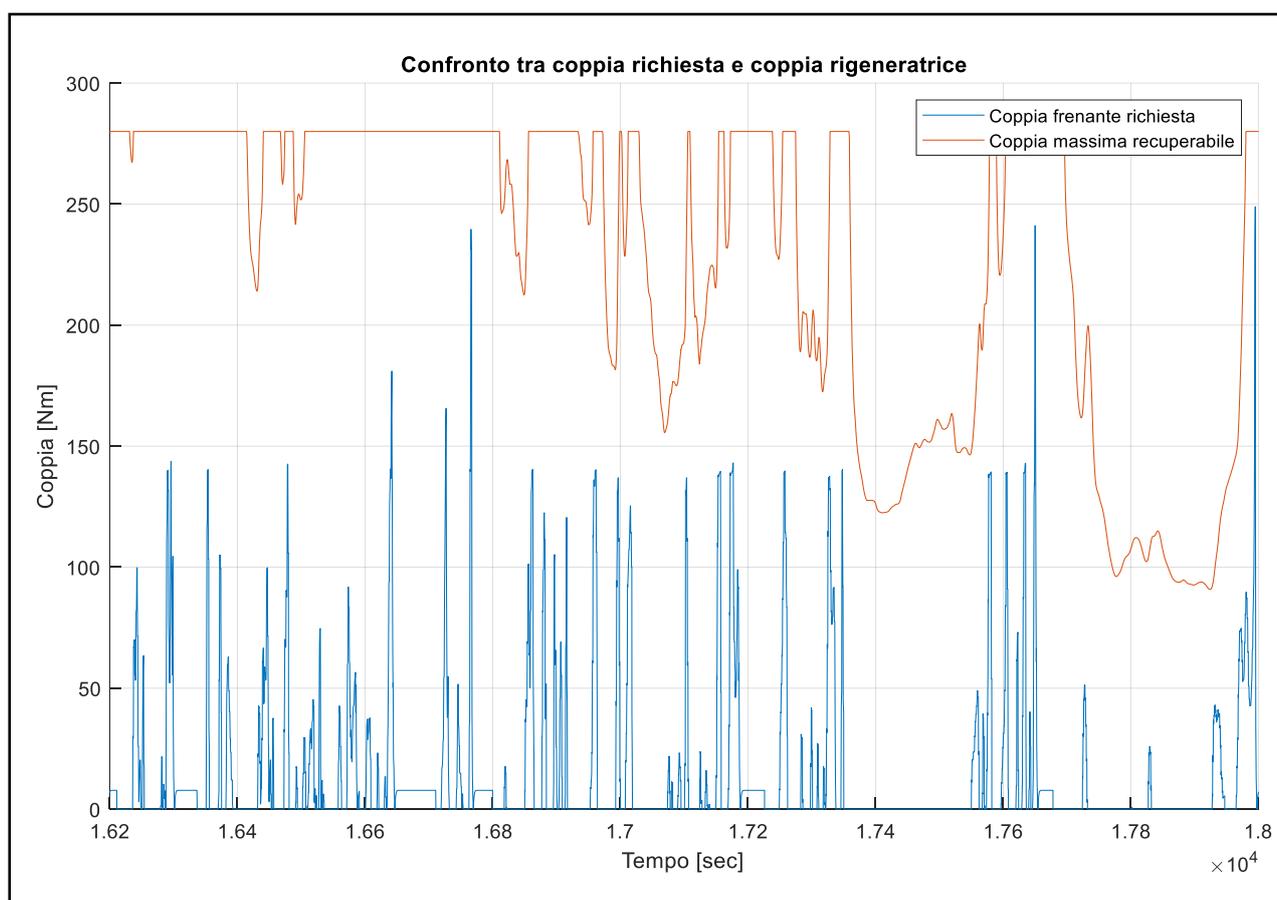


Figura 51 – Confronto tra coppie frenanti del decimo ciclo WLTP

In generale, una volta superate le fasi transitorie iniziali nelle quali la richiesta di coppia frenante da parte del conducente diminuisce costantemente, il suo modulo risulta sempre inferiore a quello della massima coppia rigeneratrice che può essere recuperata, ripristinando parte dello state of charge del veicolo. Quindi in generale, si riesce quasi sempre a soddisfare la richiesta di decelerazione da parte del conducente, per mantenere il profilo di velocità del ciclo WLTP prestabilito, tranne che in brevi tratti in cui le velocità sono molto ridotte

(inferiori al limite minimo di soglia riportato nella lookup table della velocità e pari a 2 m/s), e lo state of charge è prossimo al 100%, con conseguente annullamento della rigenerazione, e richiesta di attivazione del freno tradizionale dissipativo per poter fornire la coppia frenante richiesta.

A tal proposito sono state anche condotte delle simulazioni in cui il freno tradizionale dissipativo è stato eliminato, facendo rimanere attivo solamente il freno rigenerativo, con l'obiettivo di massimizzare la ricarica rigenerativa, consentendo in quasi tutti i tratti del ciclo WLTP di seguire il profilo della velocità, tranne che per pochi intervalli di tempo, in cui il freno rigenerativo non risultava attivo, data la bassa velocità di crociera della vettura.

Dal confronto tra queste due curve, viene valutato istante per istante il valore minimo tra le due, rappresentato in Figura 52, al fine di calcolare la coppia che dovrà essere utilizzata per la frenata rigenerativa, seguendo la seguente logica:

- Se la coppia frenante richiesta è inferiore alla coppia massima recuperabile, il minimo tra le due funzioni corrisponde alla coppia frenante richiesta, ovvero tutta la coppia di cui necessita il veicolo viene fornita grazie alla frenata rigenerativa;
- Se la coppia frenante richiesta fosse superiore alla coppia massima recuperabile, il minimo corrisponde alla coppia massima recuperabile, e sarebbe allora necessario ricorrere anche al freno dissipativo per sopperire alla mancanza di coppia frenante richiesta.

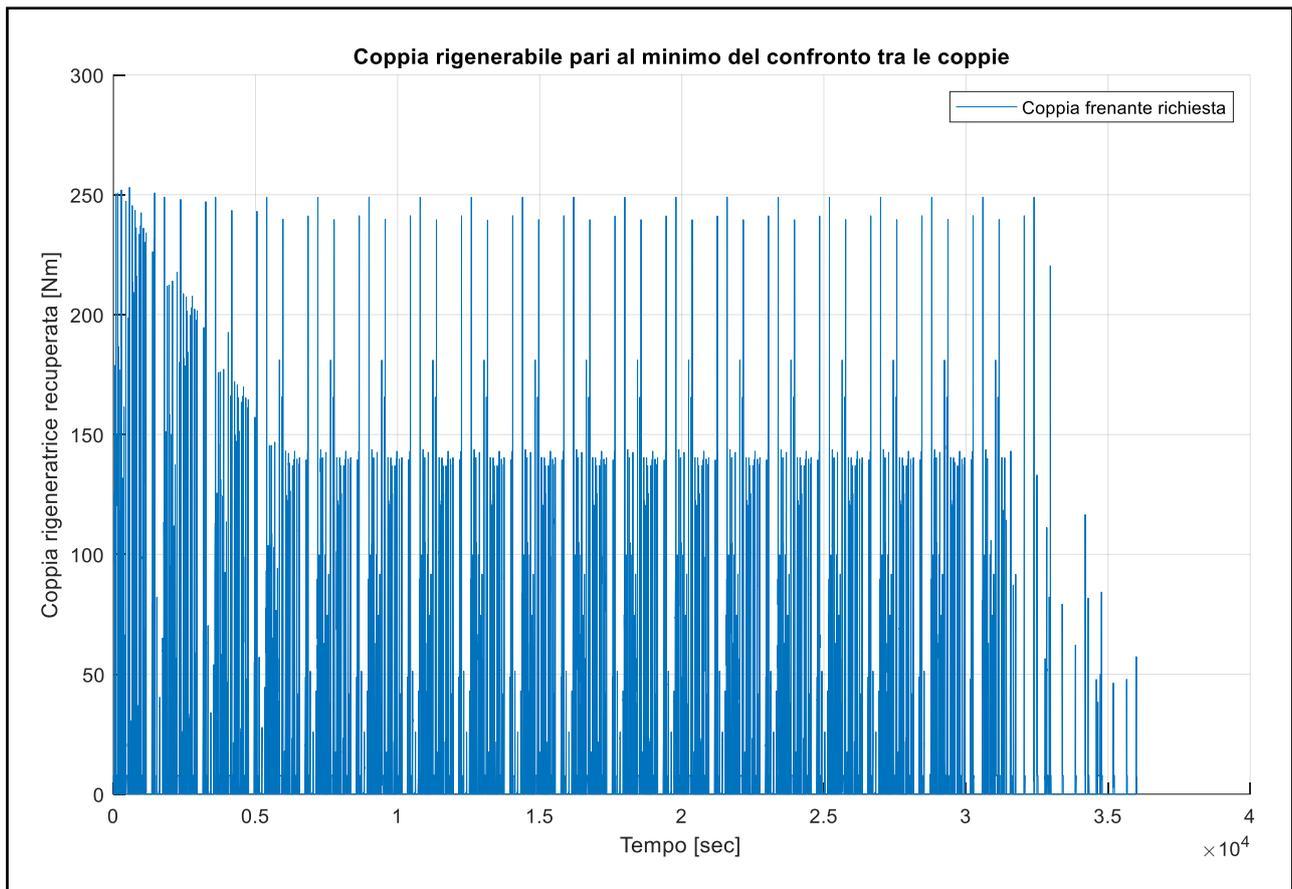


Figura 52 – Coppia rigenerabile pari al minimo del confronto tra le coppie

Fatte queste considerazioni, e determinata la coppia che potrà essere utilizzata per la rigenerazione (passaggio che avverrà nel seguito), si passa ora alla determinazione del coefficiente globale di rigenerazione, che dovrà poi essere moltiplicato puntualmente per la curva di minimo appena definita, in modo da poter conoscere l'effettiva coppia rigenerante che il sistema userà durante le fasi di decelerazione.

7.1.4 – Analisi dei coefficienti rigenerativi

Analizzate le richieste di coppia frenante da parte del conducente, e della massima coppia rigenerabile, si prendono ora in esame dei coefficienti moltiplicativi che verranno applicati alla massima coppia rigenerabile, per determinare l'effettiva coppia rigeneratrice che il veicolo riuscirà ad esercitare in fase di decelerazione, per ripristinare una piccola percentuale dello state of charge.

Si ricorda che i coefficienti in questione sono ben quattro, ognuno derivante da una lookup table diversa, e tutti compresi tra zero e uno.

Ci si aspetta quindi una diminuzione della coppia rigeneratrice rispetto a quella massima, definita al paragrafo precedente, data dal prodotto tra quest'ultima ed i coefficienti di seguito elencati:

- Coefficiente ON/OFF relativo alla velocità;
- Coefficiente relativo allo state of charge;
- Coefficiente relativo alla velocità di crociera;
- Coefficiente relativo all'intensità della decelerazione.

Si ricorda inoltre che sia il terzo che il quarto coefficiente, nel modello Simulink sono subito seguiti da un gain ciascuno, rispettivamente pari a 2 e 3, e vengono di seguito descritti con il fattore moltiplicativo già compreso, per cui i valori massimi oscilleranno tra il valore 2 e lo 0 per il terzo coefficiente, e tra il valore 3 e 0 per il quarto coefficiente.

7.1.5 – Coefficiente rigenerativo ON/OFF in funzione della velocità

Lo logica della frenata rigenerativa non avviene in ogni istante del moto, ma si attiva solo se la velocità della vettura supera un valore minimo di soglia, e viene solo se tale velocità supera un valore massimo di soglia; se invece la velocità della vettura è compresa tra questi due valori di soglia, si effettua un'interpolazione lineare, in modo da avere una variazione progressiva del coefficiente rigenerativo legato a tale parametro. Si genera in questo modo un segnale ON/OFF che attiva e disattiva la ricarica della batteria durante la fase di frenata, in funzione della velocità di crociera del veicolo, definita nella logica dell'e-Pedal attraverso una lookup table, in cui il valore minimo di soglia è pari a 2 m/s, mentre il valore massimo di soglia corrisponde a 3 m/s. Se si applica tale modello ad un percorso completo con la Nissan Leaf e+, si ottiene un andamento ON/OFF come riportato in Figura 53.

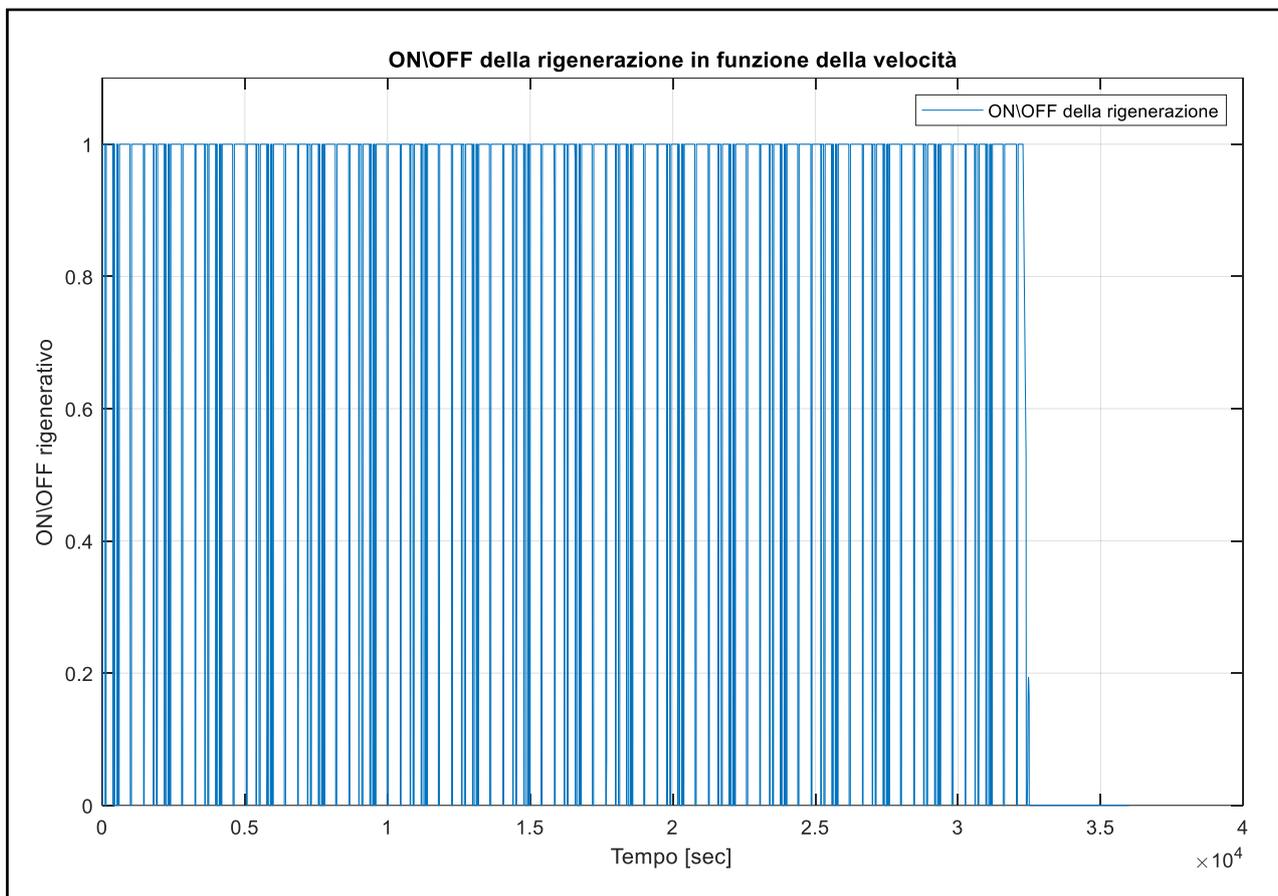


Figura 53 – Coefficiente ON/OFF relativo alla velocità

Da questo grafico si deduce come l'andamento della funzione ON/OFF sia pressoché verticale, dovuto al fatto che i valori di soglia sono molto vicini tra di loro (in modulo), quindi la transizione della frenata rigenerativa da attiva ad inattiva sono praticamente inesistenti,

eccetto che negli ultimi istanti del ciclo, in cui si evidenziano dei picchi massimi locali compresi tra zero e uno, dovuti ad un basso valore dello state of charge che non consente alla vettura di raggiungere una velocità superiore ai 3 m/s, bloccando il segnale ON/OFF in zone intermedie, con la determinazione del coefficiente di rigenerazione mediante una interpolazione dei valori della velocità del veicolo.

Viene infine mostrato l'andamento che tale coefficiente assume durante il decimo ciclo WLTP, riportato in Figura 54, evidenziando come nella maggior parte del tempo si abbia una rigenerazione massima per questo coefficiente, dato che la velocità sarà superiore ai 2 m/s, precedentemente definiti come soglia minima di attivazione della frenata rigenerativa. Si evidenzia inoltre, come il passaggio dal valore zero ad uno e viceversa sia pressoché istantaneo, come spiegato in precedenza.

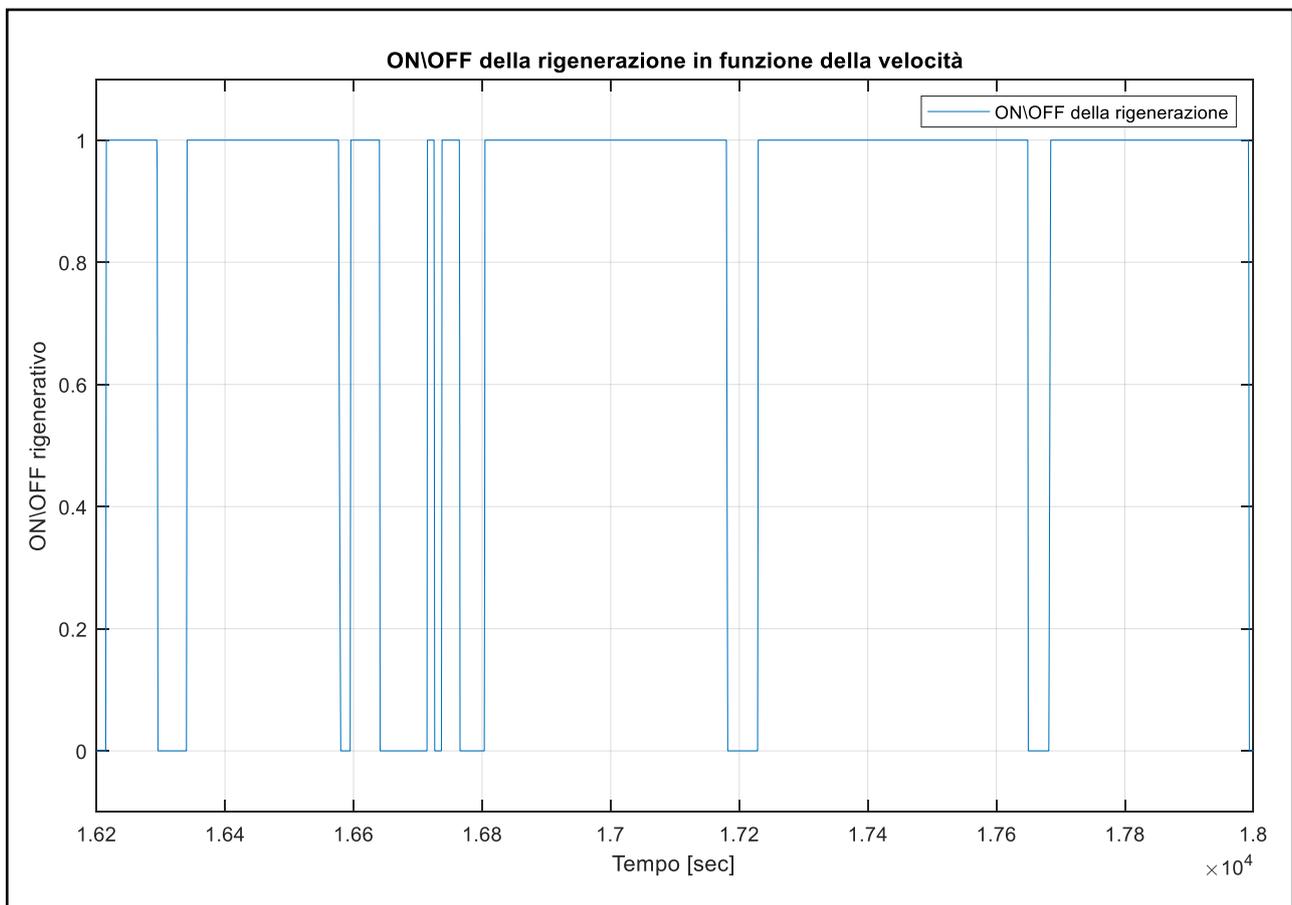


Figura 54 – Coefficiente ON/OFF del decimo ciclo WLTP

7.1.6 – Coefficiente rigenerativo relativo allo state of charge

Il secondo coefficiente qui descritto si riferisce al parametro dello state of charge, ed ha il compito di salvaguardare la salute a lunga durata della batteria, limitando l'energia che il veicolo è in grado di ripristinare attraverso la frenata rigenerativa, durante le prime fasi del percorso. Questo perché la carica iniziale della batteria è pari al 100% come ipotesi di progetto, e secondo quanto riportato nella lookup table riportata in Tabella 15, l'efficacia della frenata rigenerativa viene limitata nei tratti iniziali del percorso.

% SOC	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Coefficiente rigenerativo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,35	0

Tabella 15 - Lookup table dello state of charge per la logica dell'e-Pedal

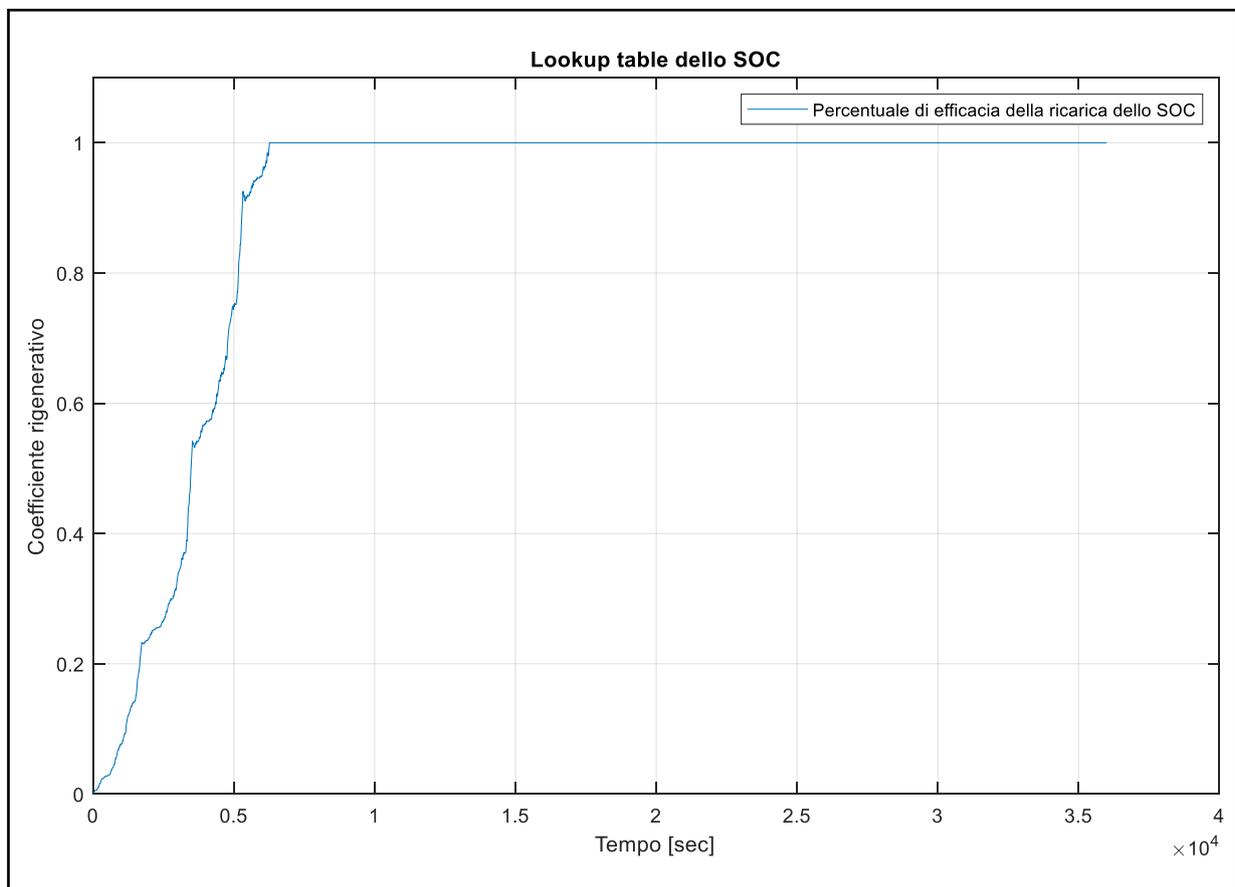


Figura 55 – Coefficiente di rigenerazione dello state of charge (SOC)

Per questi motivi, nella parte iniziale del grafico in Figura 55, si nota un incremento continuo del coefficiente di rigenerazione, dovuto alla progressiva diminuzione dello state of charge della batteria, fino a raggiungere il massimo una volta scesi al di sotto dell'80%.

7.1.7 – Coefficiente di rigenerazione della velocità

Il coefficiente di rigenerazione legato alla velocità di crociera della vettura è il risultato dei dati contenuti nella lookup table del sistema e-Pedal relativa alla velocità (di seguito riportata per comodità in Tabella 16), secondo la quale per bassi valori di velocità si ha una efficacia della rigenerazione elevata, mentre per alti valori della velocità si ha un'efficacia di rigenerazione sempre minore, come mostrato in Figura 56.

Velocità [km/h]	0	50	80	90	100	110	120	130
Velocità [m/s]	0	13,89	22,22	25,00	27,78	30,56	33,33	36,11
Coefficiente rigenerativo	1	1	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0

Tabella 16 - Lookup table della velocità per la logica dell'e-Pedal

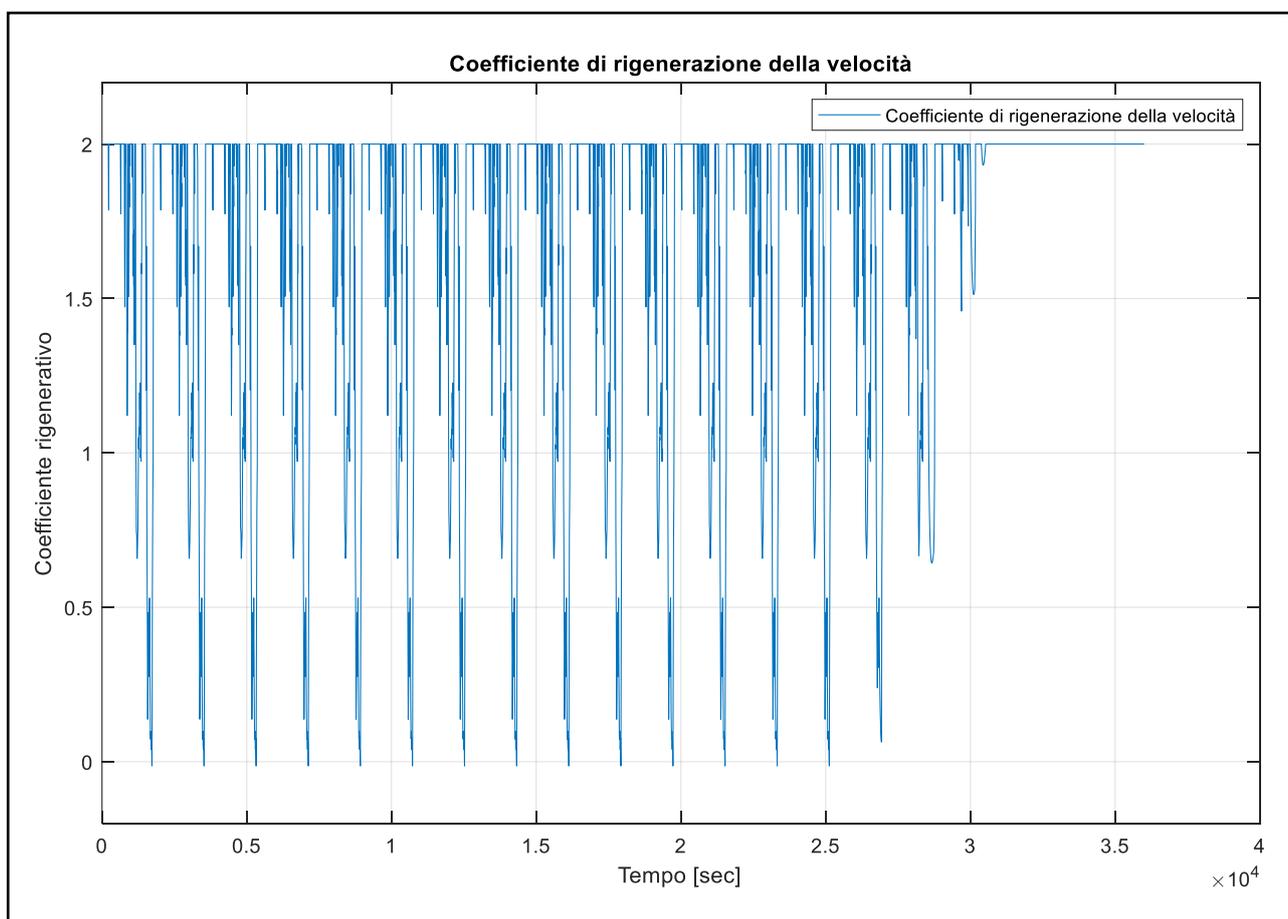


Figura 56 – Coefficiente di rigenerazione della velocità

L'andamento generale del coefficiente di rigenerazione legato alla velocità è ciclico nel tempo e non subisce variazioni, se non nei tratti finali del percorso, in cui si nota come esso tenda asintoticamente ad un valore unitario, a causa del basso valore residuo dello state of charge,

che non permette di raggiungere velocità elevate, costringendo la vettura a viaggiare a velocità limitate, mantenendo quindi un coefficiente rigenerativo massimo, come indicato nella lookup table.

Al contrario, i cicli WLTP che non si trovano nelle zone finali del percorso, e che non sono quindi soggetti ad anomalie nel comportamento, generano dei valori del coefficiente di rigenerazione come quelli riportati in Figura 57, in cui ne viene raffigurato l'andamento durante il decimo ciclo WLTP.

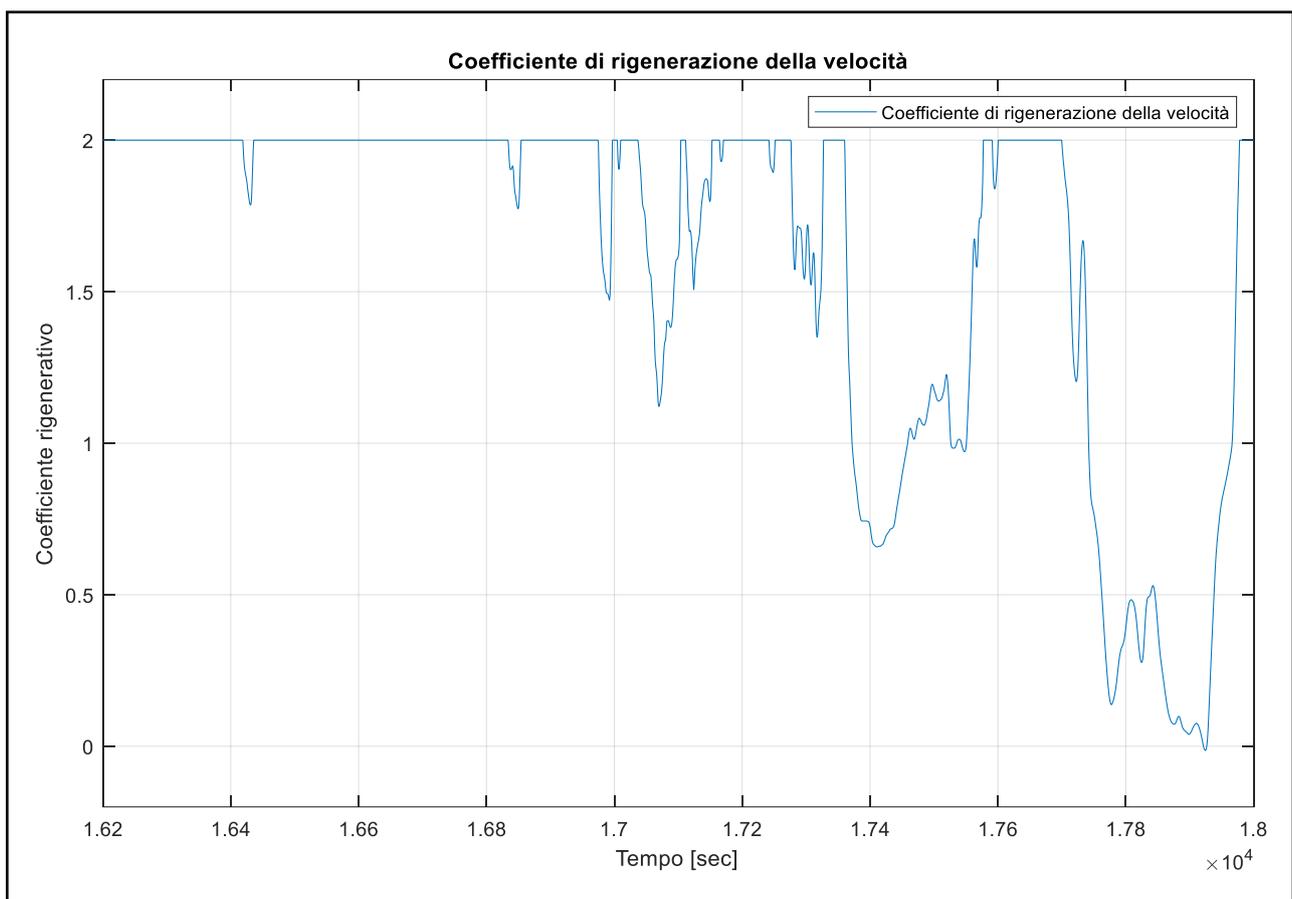


Figura 57 – Coefficiente di rigenerazione della velocità del decimo ciclo WLTP

In ultimo, si osserva che l'andamento del coefficiente rispecchia quello della velocità del ciclo WLTP, dato che viene generato proprio in funzione della velocità, ed assume quindi un andamento simile ad essa (in questo caso speculare).

7.1.8 – Coefficiente di rigenerazione della decelerazione

Il coefficiente di rigenerazione legato all'intensità della decelerazione fa riferimento alla pendenza che assume l'e-Pedal, compresa tra 0% ed il 50% di escursione massima consentita, e presenta dei valori massimi nel tratto iniziale del percorso, per poi assumere un andamento decrescente, fino al quarto ciclo WLTP, superato il quale i valori dei picchi si ripetono ciclicamente, fino alle ultime fasi del percorso, in cui il coefficiente rigenerativo decresce nuovamente, a causa del basso valore dello state of charge, che non consente di raggiungere velocità elevate, con conseguente diminuzione della richiesta di decelerazione da parte del conducente. In Figura 58 viene riportato l'andamento generale del coefficiente di rigenerazione della decelerazione, per tutta la durata del percorso.

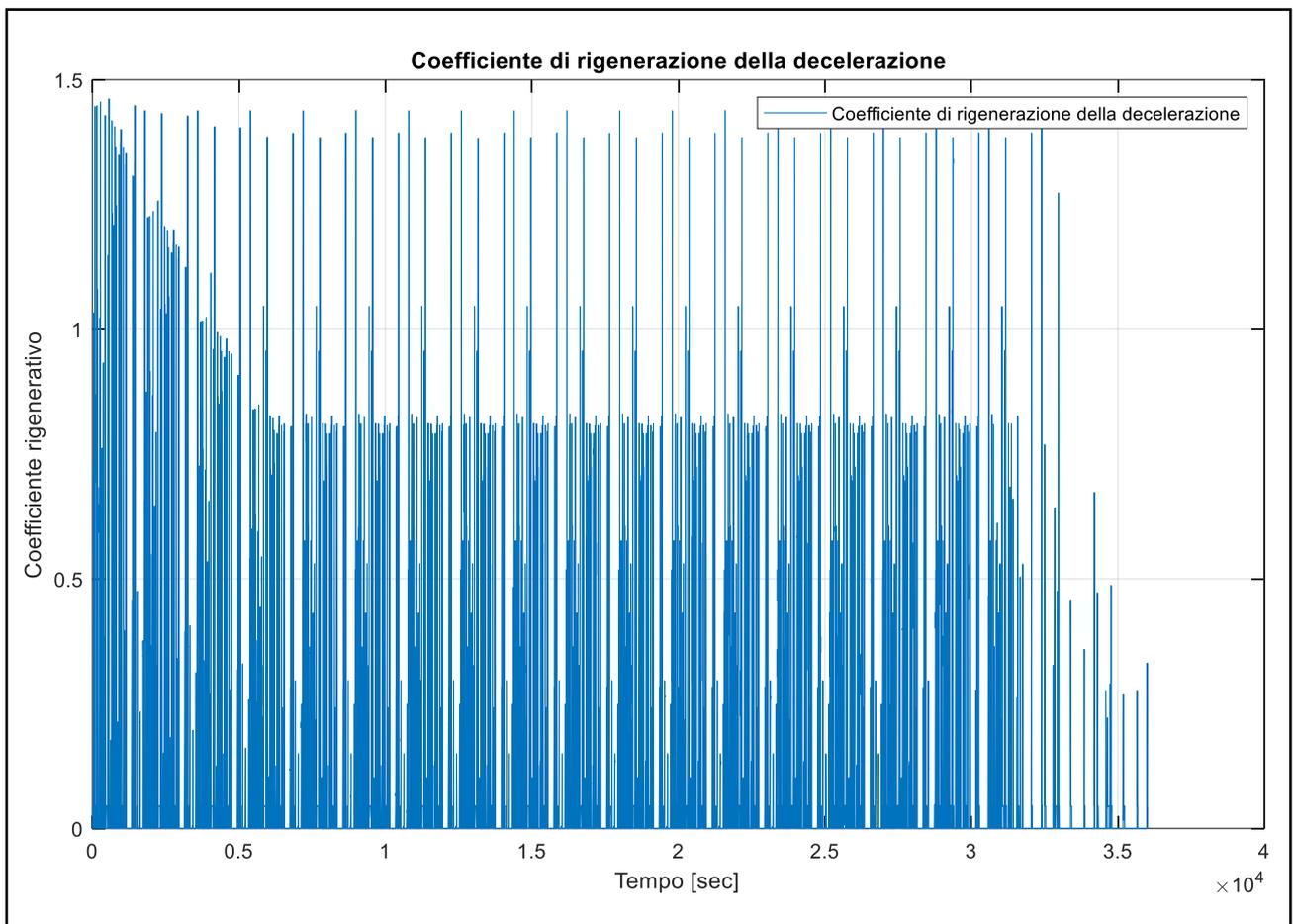


Figura 58 – Coefficiente di rigenerazione della decelerazione

Il tratto iniziale con andamento decrescente è dovuto al fatto che nei primi cicli WLTP, avendo uno state of charge iniziale pari al 100%, si ha diminuzione dell'intensità della frenata rigenerativa dovuta alle lookup table, e di conseguenza, la richiesta di decelerazione da parte

del conducente viene amplificata per poter sopperire al deficit provocato dall'elevata carica residua della batteria che limita l'intensità della frenata rigenerativa. In questo modo (ma non per tutta la durata del percorso), il veicolo è in grado di garantire la decelerazione richiesta dal conducente, senza utilizzare il freno dissipativo tradizionale, ma utilizzando unicamente la frenata rigenerativa del sistema e-Pedal, in maniera tale da poter seguire coerentemente il profilo di velocità del ciclo WLTP prestabilito, ripristinando la maggior quantità possibile di energia. Laddove la frenata rigenerativa non dovesse essere sufficiente per decelerare quanto richiesto, interverrà il freno dissipativo (tradizionale) per fornire la coppia frenante mancante. Si ribadisce ancora una volta che il freno dissipativo dovrà sempre rimanere attivo e pronto all'uso, per ogni evenienza.

Si riporta infine l'andamento del coefficiente di rigenerazione legato alla decelerazione per il decimo ciclo WLTP, in cui non vi sono anomalie come ad inizio percorso, o al termine dello stesso.

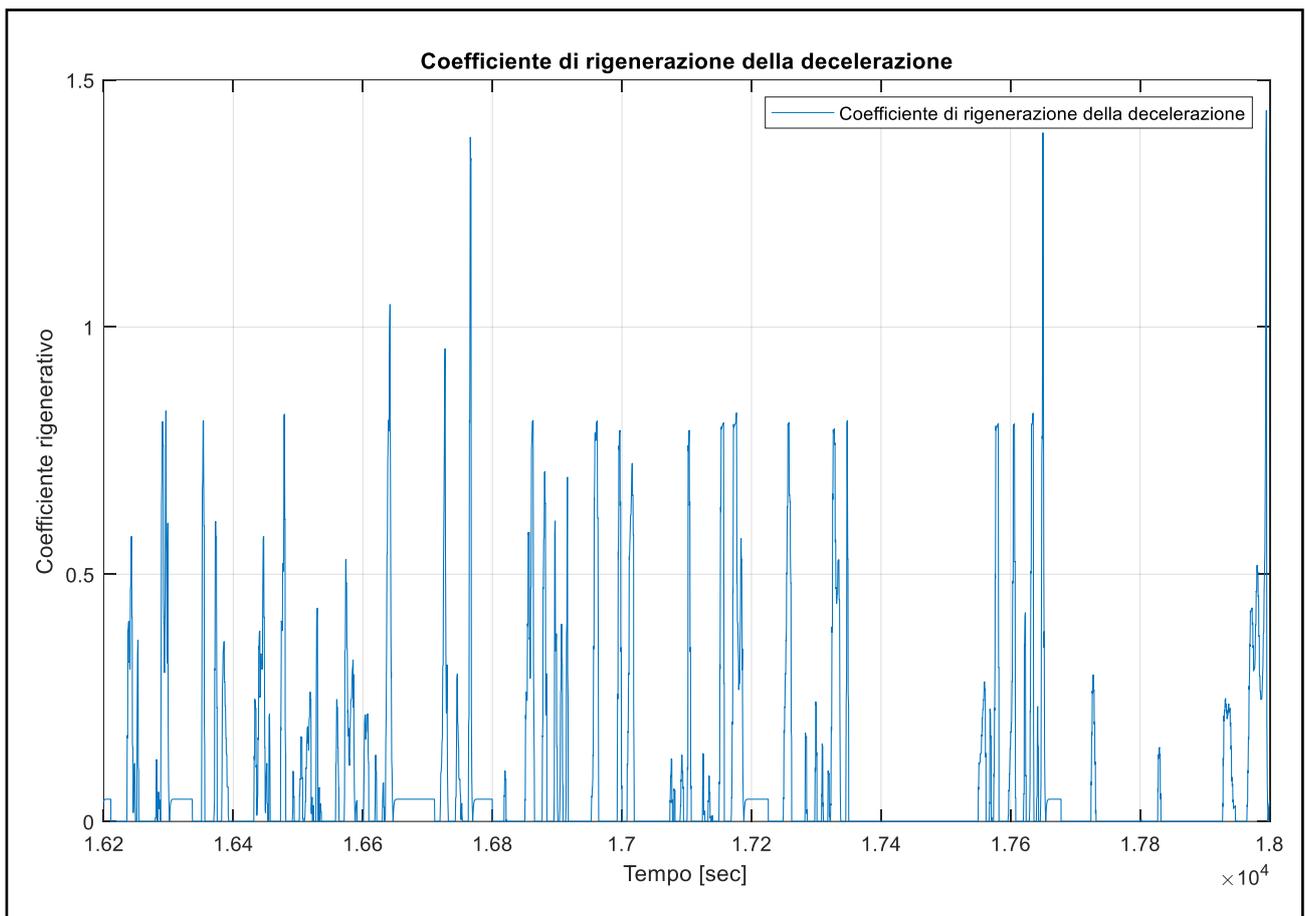


Figura 59 – Andamento del coefficiente di rigenerazione del decimo ciclo WLTP

7.1.9 – Coefficiente globale di rigenerazione

Il coefficiente globale della rigenerazione è definito come il prodotto tra i quattro coefficienti rigenerativi discussi precedentemente, e rappresenta il fattore moltiplicativo da applicare alla massima coppia rigenerabile, per la valutazione della coppia effettiva di rigenerazione, ovvero la coppia frenante rigenerativa che verrà di fatto applicata, in caso di richiesta di decelerazione da parte del conducente. Il suo andamento viene riportato in Figura 60.

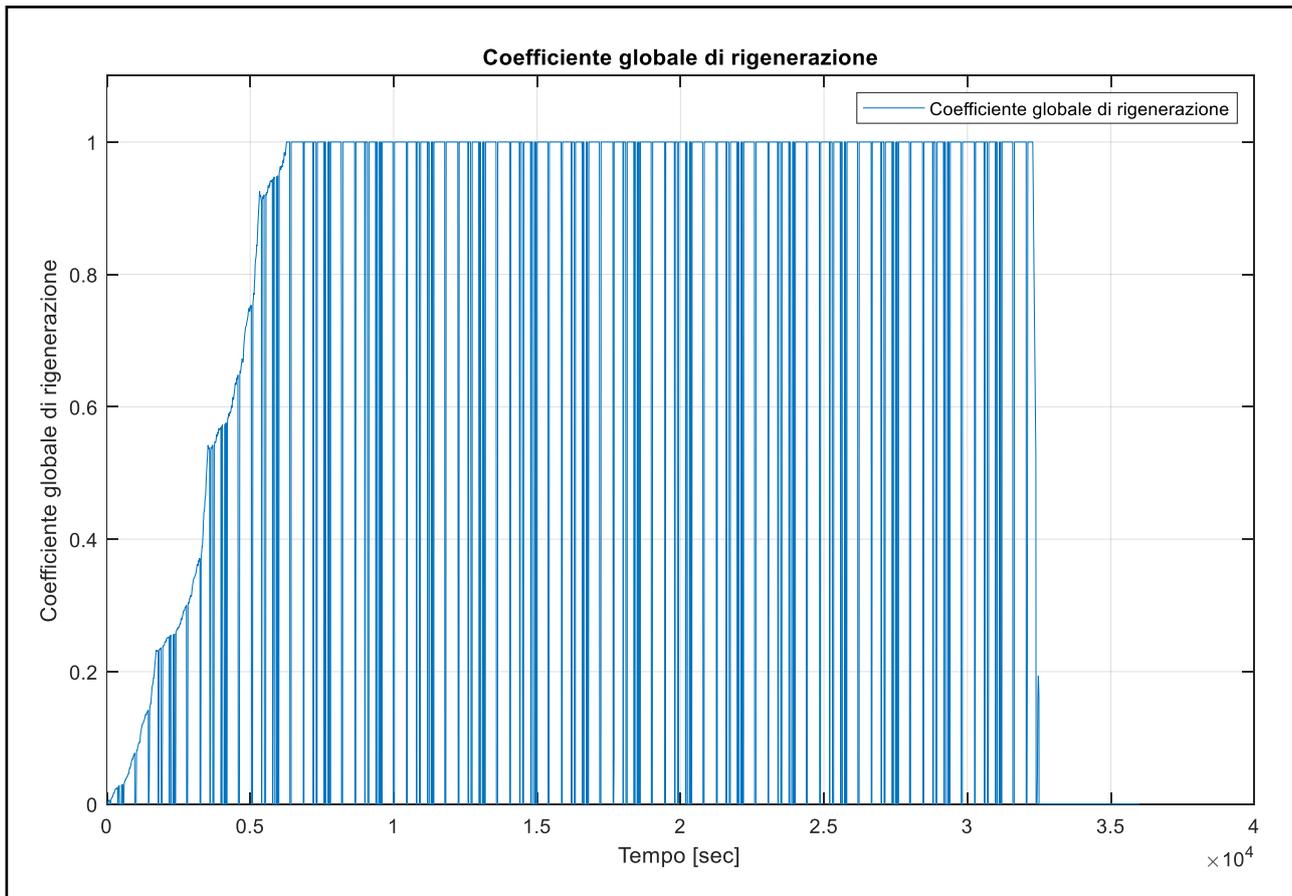


Figura 60 – Coefficiente globale di rigenerazione

Nella prima parte del percorso, ovvero per i primi quattro cicli WLTP, il coefficiente globale di rigenerazione riprende lo stesso andamento mostrato dal coefficiente di rigenerazione legato allo state of charge in Figura 55, per poi assumere un andamento ciclico, come riportato in Figura 60. Nello specifico, l'andamento ciclico che si ripete per ogni ciclo WLTP (30 minuti), viene riportato in Figura 61, il quale analizza il decimo ciclo WLTP, e si nota il passaggio quasi istantaneo dal valore nullo al valore unitario, a cui corrispondono rispettivamente una coppia rigeneratrice effettiva nulla, e una coppia rigeneratrice effettiva massima, pari alla massima coppia rigenerabile.

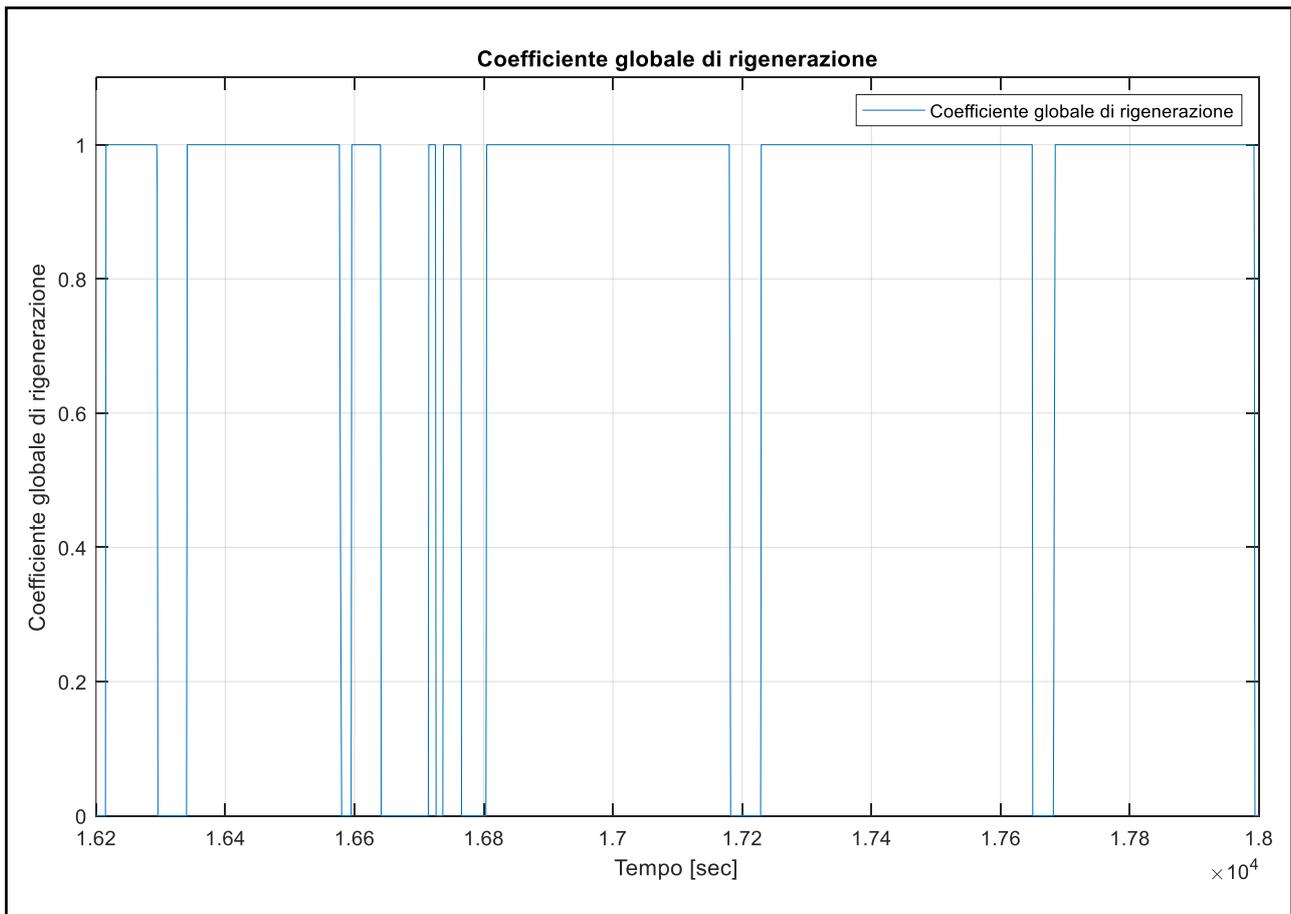


Figura 61 – Coefficiente globale di rigenerazione del decimo ciclo WLTP

Si ricorda inoltre che il coefficiente rigenerativo globale qui rappresentato, viene processato con un saturatore nel modello Simulink, che limita il suo valore tra gli intervalli zero ed uno, dato che nominalmente, per la maggior parte del tempo, assume un valore superiore all'unità a causa dei gain moltiplicativi applicati ai singoli coefficienti rigenerativi di cui esso è composto. Questa saturazione viene applicata perché avere un coefficiente rigenerativo superiore all'unità sarebbe privo di significato fisico, dato che non sarebbe possibile esercitare una coppia rigeneratrice superiore a quella massima che il veicolo sarebbe in grado di fornire durante le fasi della decelerazione.

7.1.10 – Coppia frenante rigeneratrice

Una volta determinato l'andamento della massima coppia rigeneratrice in fase di decelerazione, riportata in Figura 52, la si moltiplica per il coefficiente globale di rigenerazione, il quale tiene in considerazione tutte le logiche adottate per il sistema e-Pedal. Da questo prodotto nasce la coppia rigenerativa che effettivamente viene convertita in energia elettrica per incrementare la carica residua della batteria, come mostrato in Figura 62.

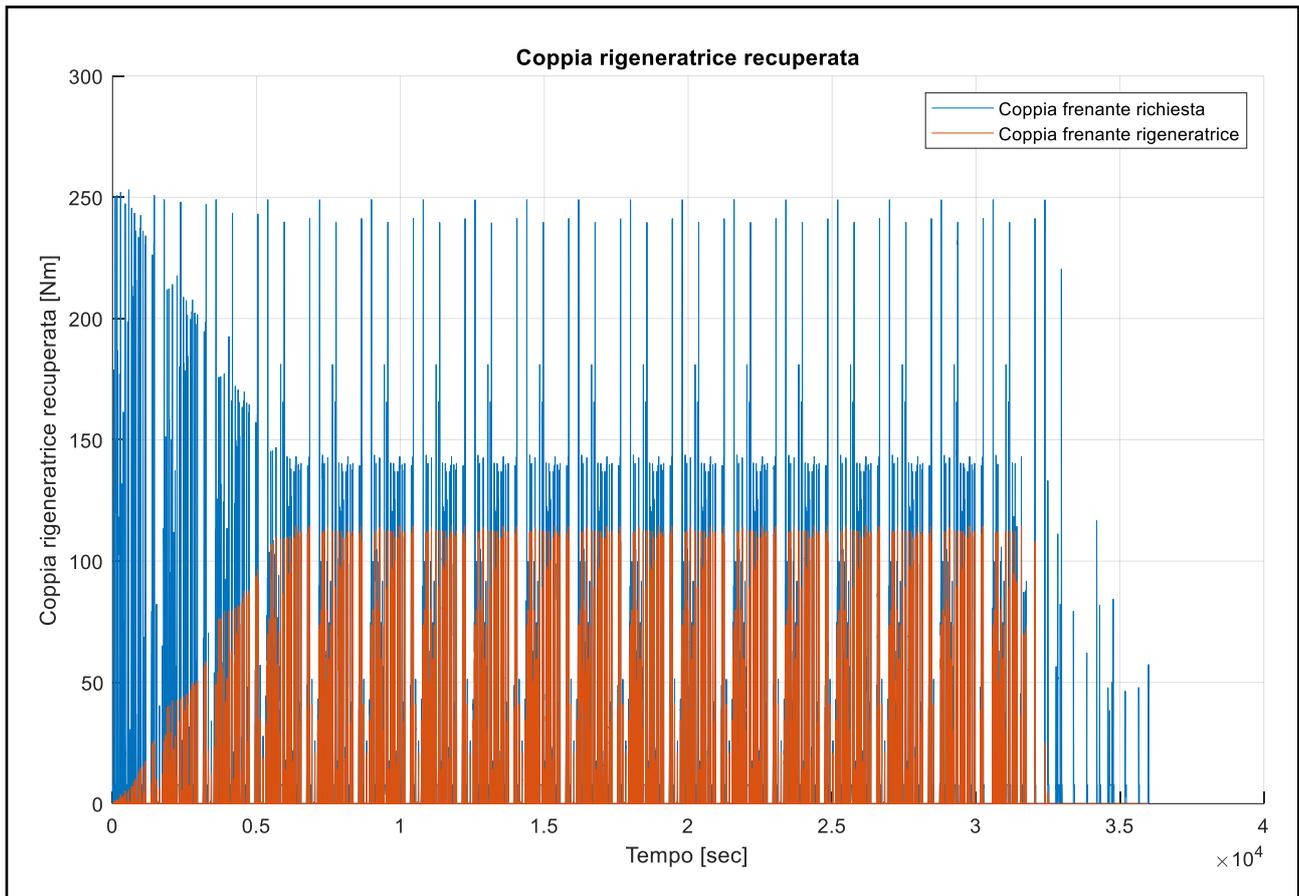


Figura 62 - Coppia frenante rigeneratrice

Come si nota dal grafico, la coppia che effettivamente viene utilizzata per la rigenerazione (curva rossa) è inferiore a quella massima recuperabile (curva blu), a causa dell'andamento del coefficiente globale di rigenerazione: nei primi cicli WLTP la coppia rigenerativa effettiva è nettamente inferiore a quella richiesta, dato che il coefficiente rigenerativo legato allo state of charge in quell'intervallo è molto basso; allo stesso modo, per gli ultimi cicli WLTP del percorso, il valore della coppia frenante rigenerativa è basso, se non nullo, dato che sia il coefficiente rigenerativo relativo alla decelerazione, sia il coefficiente legato alla velocità del veicolo, sono molto piccoli. Questo, dovuto al fatto che negli ultimi cicli del percorso, la poca

carica residua rimasta, non riesce a soddisfare le richieste di coppia motrice da parte del conducente, con conseguente diminuzione della richiesta di coppia frenante rigeneratrice e limitazione della velocità di picco locale raggiunta dalla vettura.

7.1.11 – Coppia frenante dissipativa

Dopo aver determinato la coppia richiesta dal conducente e la coppia rigeneratrice effettiva di rigenerazione che il veicolo riesce ad esercitare in fase di decelerazione, si valuta la restante parte di coppia frenante che verrà richiesta all'impianto frenante classico, ovvero l'impianto dissipativo per attrito, per soddisfare tutta la richiesta di coppia frenante totale. In Figura 63 viene riportato l'andamento della coppia frenante dissipativa che deve essere fornita come in aggiunta a quella rigenerativa per decelerare quanto richiesto dal conducente.

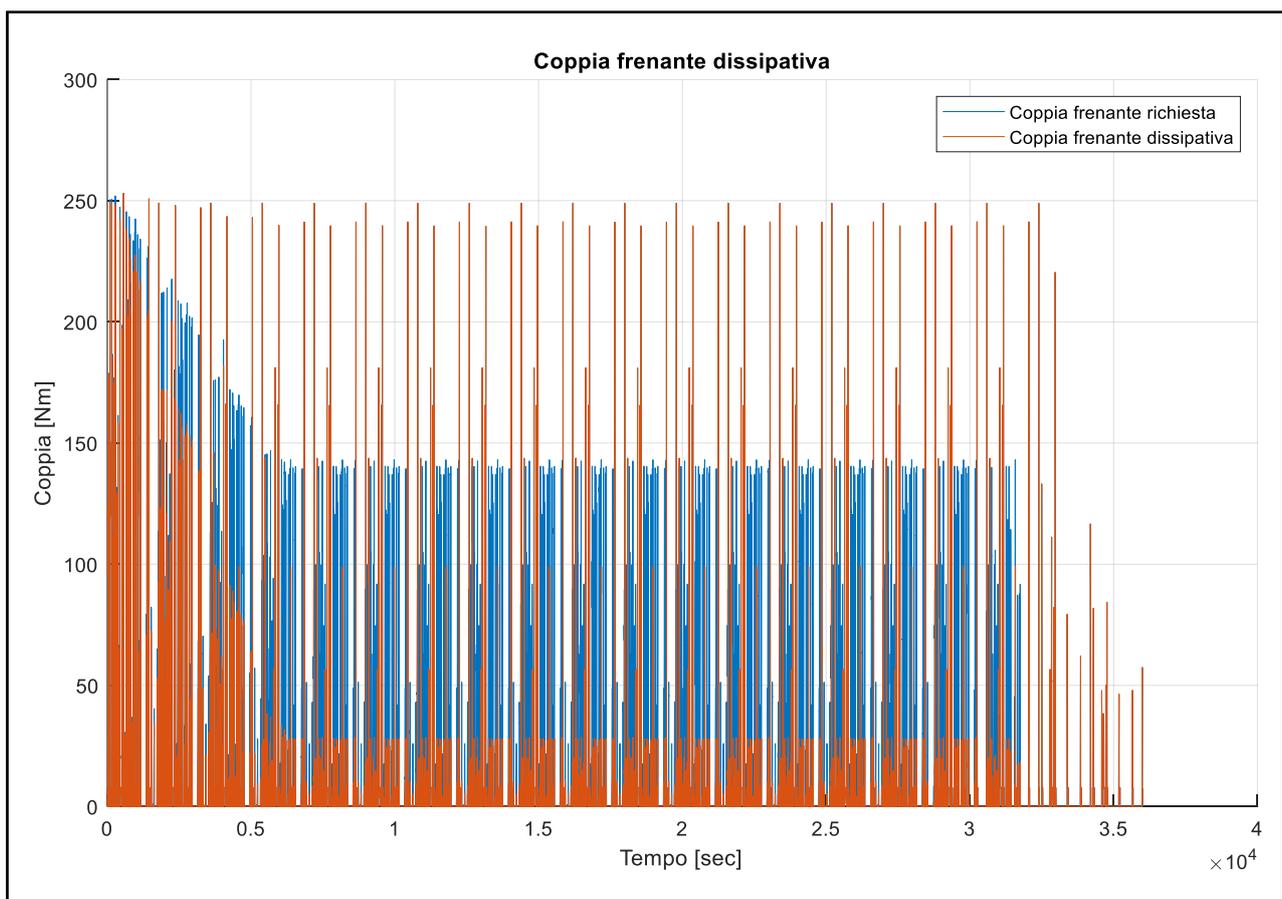


Figura 63 - Coppia frenante dissipativa per attrito

Dal confronto diretto tra la Figura 62 e la Figura 63, rispettivamente la coppia frenante rigenerativa e la coppia frenante dissipativa, si deduce che la coppia frenante totale richiesta dal conducente, non è altro che la sommatoria di queste due. Infatti, secondo la logica dell'e-Pedal, la coppia frenante dissipativa deve intervenire solo nel caso in cui la frenata rigenerativa non è sufficiente a far decelerare il veicolo in base a quanto richiesto. Analizzando nel dettaglio la coppia frenante dissipativa, si nota come essa coincida con l'andamento della coppia frenante richiesta dal conducente nelle fasi iniziali del percorso, e

viene in generale visualizzata sovrapposta a quest'ultima, da cui si nota un solo andamento nelle fasi finali del percorso e nei picchi maggiori, dovuto ad una semplice sovrapposizione delle due funzioni, anche se in modulo sono circa uguali, a meno della coppia rigenerativa che in questi frangenti è circa nulla.

7.1.12 – State of charge

Il grafico dello state of charge rappresentato in Figura 64 mostra l'andamento della carica residua della batteria del veicolo durante tutto il percorso, effettuato secondo una ripetizione continua del ciclo WLTP, con un valore iniziale dello SOC pari al 100%, come condizione di progetto, fino all'arresto della vettura, dovuto alla scarica completa della batteria del veicolo, che viene approssimato con una carica residua pari al 2% e non allo 0%.

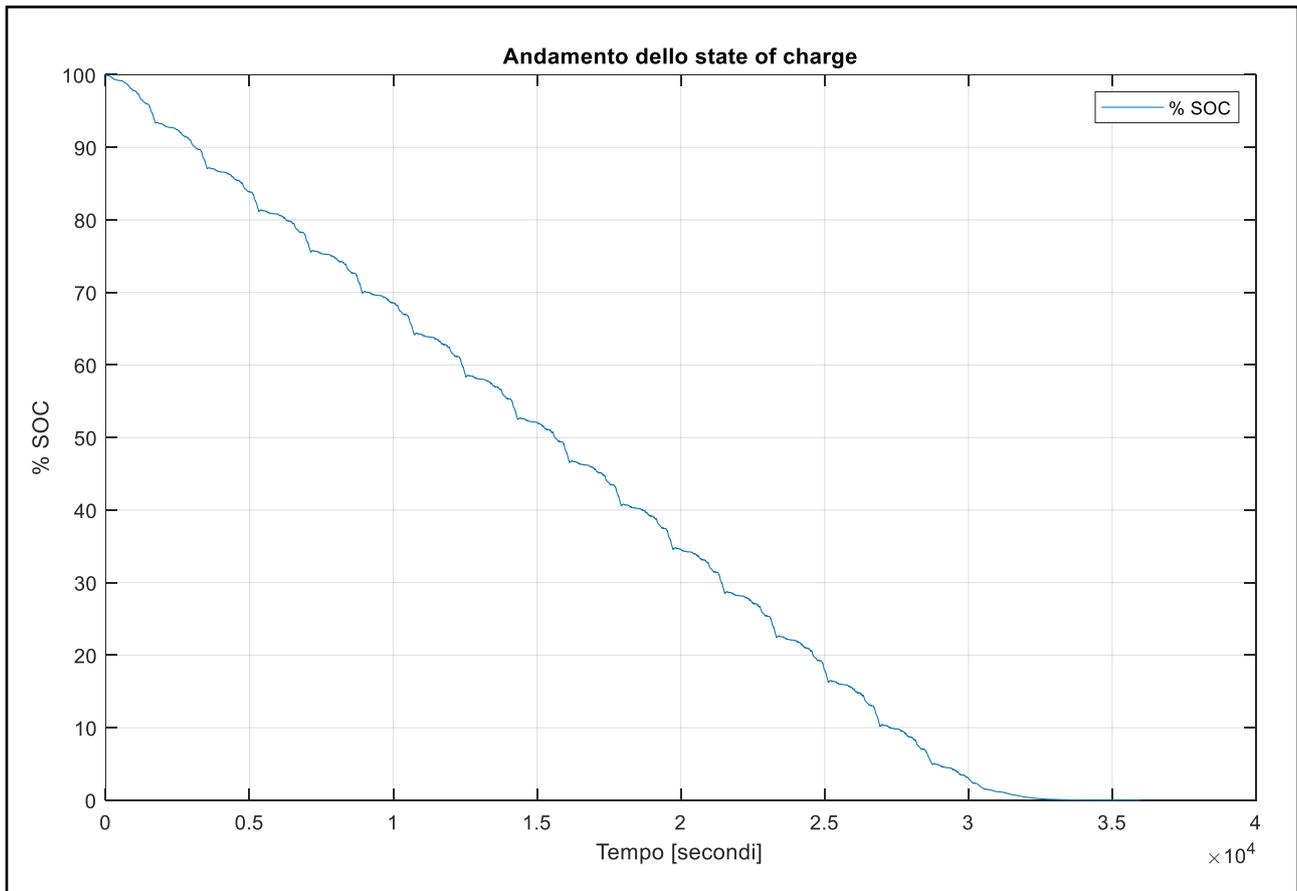


Figura 64 – State of charge di tutto il percorso

Nello specifico, si nota un'anomalia, presente negli ultimi tratti del percorso, per valori inferiori al 5% dello state of charge, in cui l'andamento dello stesso non rispecchia quello visto nei cicli precedenti, a causa del basso livello di carica residua della batteria. Nello specifico, il livello di state of charge pari al 2% viene raggiunto dopo circa otto ore e mezza (dopo 30383 secondi). Si ricorda che questo valore viene preso come riferimento per definire l'autonomia del veicolo, dato che al di sotto del 2% dello state of charge, si ha un comportamento anomalo, approssimabile ad un asintoto che tende al valore 0%, ma che per raggiungerlo impiega molto più tempo di quanto ce ne vorrebbe nella realtà.

7.1.13 – Conclusioni relative alla prova 1

Questa prima simulazione mostra il comportamento della Nissan Leaf e+ in condizioni normali di funzionamento, al pari di quelle effettuate durante la fase di validazione del modello. Infatti, in questa simulazione non vi è ancora la logica di gestione della frenata rigenerativa legata al sistema dell'e-Pedal, presenta ancora l'impianto frenante tradizionale dissipativo, ed in coefficiente moltiplicativo della coppia rigeneratrice è pari a 0,8, come approssimazione delle perdite che possono verificarsi lungo il tragitto.

Questo è quindi il modello base del veicolo elettrico, senza una condizione particolare di partenza, il quale verrà poi confrontato con le successive simulazioni, per capire quali sono le conseguenze che il sistema e-Pedal apporta alla vettura, e come essa risponde attraverso l'analisi del profilo de velocità, della coppia frenante richiesta, della coppia rigeneratrice, della coppia frenante dissipativa, e dello state of charge della vettura.

7.2 – Prova 2

La seconda prova prevede una modifica ai parametri del modello Simulink secondo quanto segue:

- La logica del sistema e-Pedal è disabilitata;
- I freni tradizionali, ovvero quelli dissipativi sono eliminati;
- Il coefficiente di riduzione della frenata rigenerativa è pari a 0.8.

In questa nuova simulazione, i coefficienti derivanti dalle lookup table relative alla velocità del veicolo e all'intensità della decelerazione non vengono prese in esame, come per la prova 1, e vengono anche disabilitati i freni tradizionali, facendo quindi affidamento solo sulla decelerazione dovuta alla frenata rigenerativa, la quale viene anche diminuita del 20%, a causa del coefficiente moltiplicativo applicato, pari a 0,8.

Ci si aspetta quindi un incremento della richiesta di coppia frenante rispetto al primo caso esaminato, dato che non essendo presente il sistema frenante dissipativo (classico), tutta la richiesta di decelerazione dovrà essere soddisfatta dalla sola frenata rigenerativa. Di conseguenza, la coppia frenante richiesta sarà notevolmente superiore a quella massima recuperabile, per cui non si riuscirà a seguire coerentemente il ciclo WLTP di riferimento, specie nei tratti in cui si ha una rapida diminuzione della velocità, con il profilo di velocità della vettura simulata che tenderà ad assumere un andamento lineare, pari alla massima rigenerazione che il veicolo sarà in grado di fornire.

7.2.1 – Analisi del profilo di velocità

Il primo grafico che viene analizzato per la seconda simulazione, riporta il confronto tra i profili di velocità del ciclo WLTP e della vettura simulata: la curva blu indica il ciclo WLTP di riferimento, mentre la curva rossa indica il profilo di velocità che viene seguito dal veicolo simulato. Da questo primo confronto, riportato in Figura 65, si nota che sia per il primo ciclo WLTP, che per gli ultimi quattro cicli, il profilo di velocità simulato non combacia con quello ideale che la vettura dovrebbe seguire.

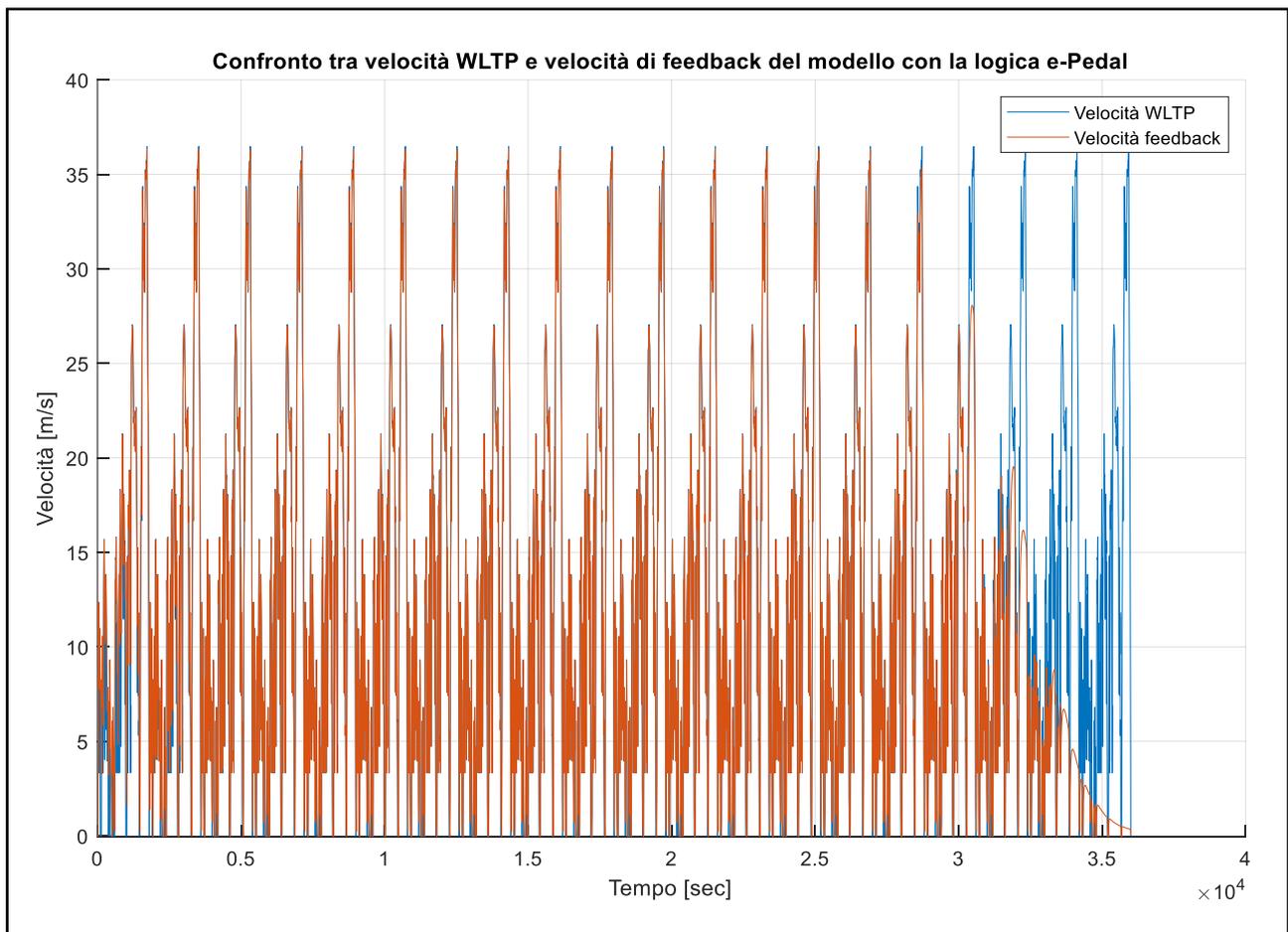


Figura 65 – Andamento dei profili di velocità della normativa e simulato

Questo perché nel primo ciclo si ha un livello di state of charge iniziale massimo, pari al 100%, che annulla completamente il fenomeno della frenata rigenerativa, ma che già alla fine del primo ciclo si attenua, incrementando l'intensità della coppia rigeneratrice in fase di frenata, permettendo così di seguire coerentemente il profilo di velocità dettato dalla normativa. Quanto appena esposto lo si può ritrovare in Figura 66, in cui ci si focalizza solo sul primo ciclo del percorso completo, in cui si evidenziano gli andamenti lineari preannunciati in

precedenza, in corrispondenza degli intervalli di tempo di cui la velocità diminuisce rapidamente.

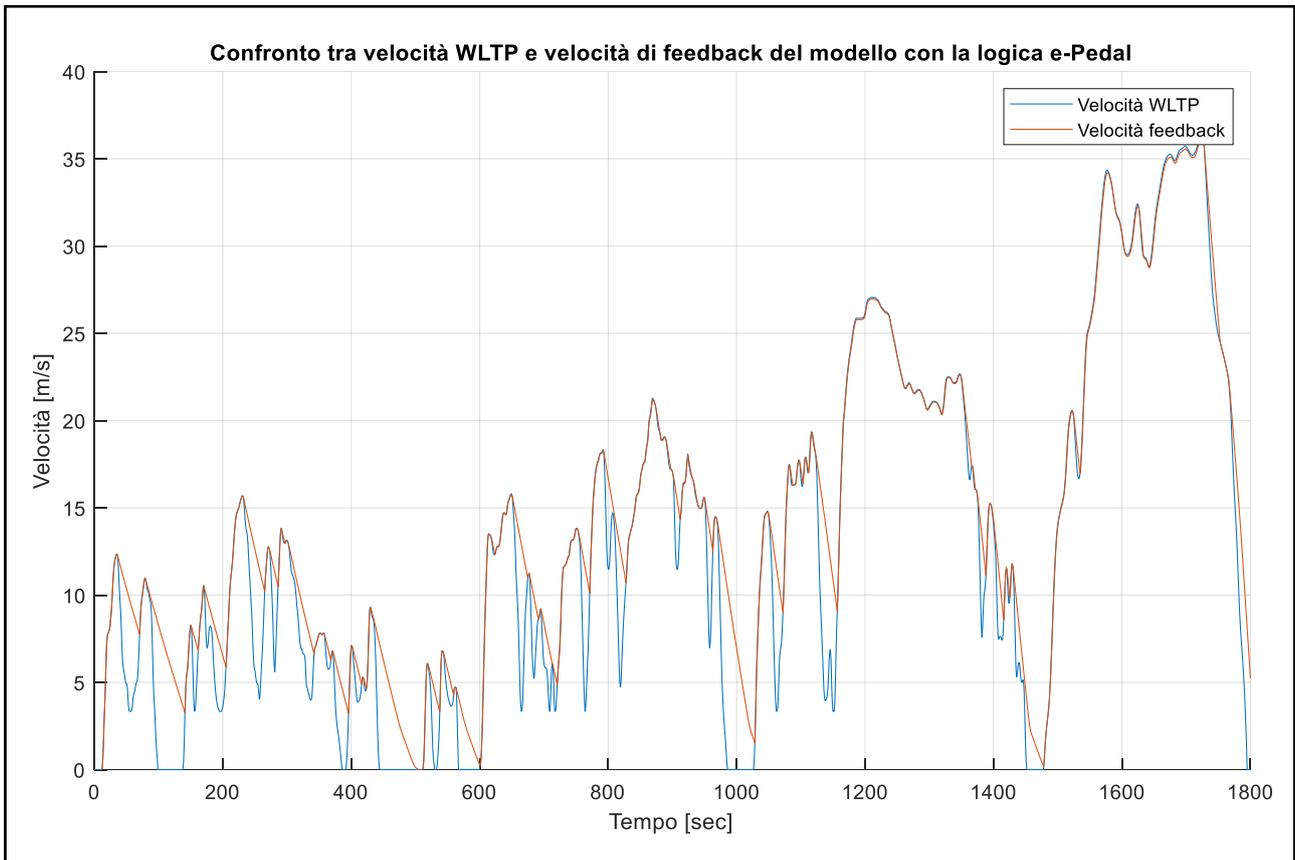


Figura 66 – Analisi del profilo di velocità sul primo ciclo WLTP

Per quanto riguarda gli ultimi quattro cicli del percorso, riportati in Figura 67, si nota come l'andamento del profilo di velocità simulata decresce nel tempo, a causa dello state of charge che è sempre più basso, e che non consente al veicolo di raggiungere le velocità dettate dal ciclo WLTP di riferimento.

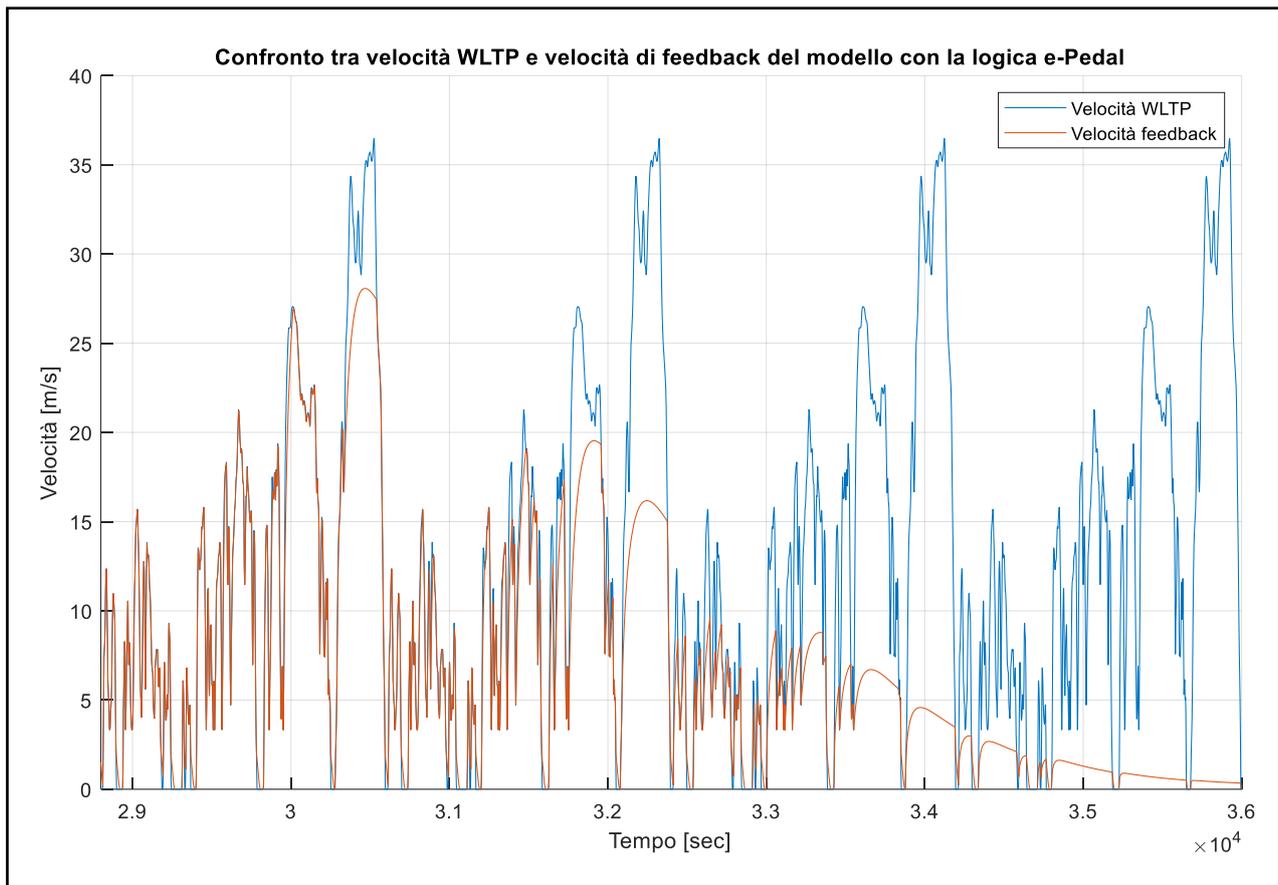


Figura 67 – Confronto dei profili di velocità per gli ultimi quattro cicli WLTP

7.2.2 – Richiesta di accelerazione e frenata

Vengono ora analizzate le richieste di coppia motrice e di coppia frenante, derivanti dall'elaborazione dei parametri di ingresso della velocità WLTP e della velocità di feedback, per tutta la durata del percorso, pari a 20 cicli WLTP.

L'andamento generale della curva dell'accelerazione (curva blu), in questa nuova configurazione è molto simile a quello visto nel primo caso analizzato (prova 1), sia per quanto riguarda i valori di picco, sia per l'andamento che esso presenta.

L'andamento generale relativo alla curva della decelerazione (curva rossa), è decisamente diverso rispetto a quello visto per la prova 1: in questa nuova configurazione i primi quattro cicli WLTP presentano dei valori della decelerazione notevolmente superiori a quelli presenti nella prova precedente, dato che in questo caso non sono presenti i freni dissipativi, e di conseguenza tutta la coppia che viene richiesta dal conducente, deve essere fornita dal sistema della frenata rigenerativa.

Dato che nei primi cicli WLTP il livello di state of charge è massimo, la frenata rigenerativa presenta un'intensità ridotta al minimo, a causa della lookup table relativa a tale parametro (state of charge). Per questo motivo, dato che l'unico freno a disposizione in questa prova è proprio quello rigenerativo, e che non riuscirà a fornire tutta la decelerazione richiesta dal conducente, la posizione dell'e-Pedal dovrà compensare tale deficit, incrementando quindi la richiesta di decelerazione, anche se poi non verrà comunque soddisfatta perché superiore al limite massimo consentito dalla macchina.

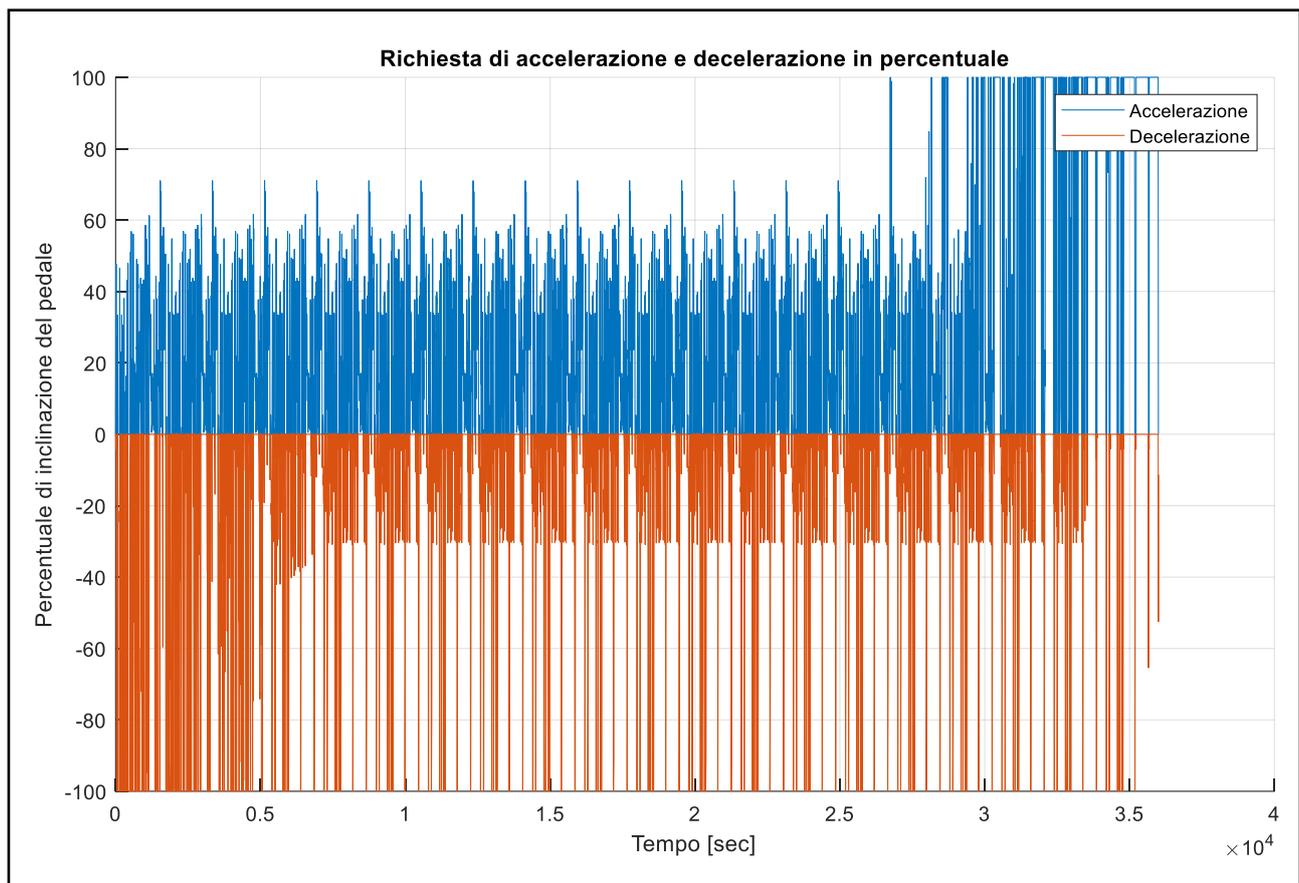


Figura 68 – Richiesta di accelerazione e decelerazione per tutta la durata del percorso

Vengono di seguito mostrati in Figura 69 gli andamenti relativi alla richiesta di coppia motrice e alla richiesta di coppia frenante per il decimo ciclo WLTP, rispettivamente con curva blu e con la curva rossa, e che rappresentano un andamento di un ciclo che ha raggiunto la condizione di regime, senza anomalie particolari.

Per quanto riguarda la pendenza dell'e-Pedal, si nota una diminuzione dell'inclinazione in corrispondenza di una maggiore richiesta della coppia frenante rigeneratrice. Infatti, una volta raggiunta la condizione di regime, nella prova 1 si registrava un valore medio attorno al 35% della pendenza massima consentita, come mostrato in Figura 68, mentre in questa nuova configurazione tale valore si attesta invece sul 32%, come riportato in Figura 70.

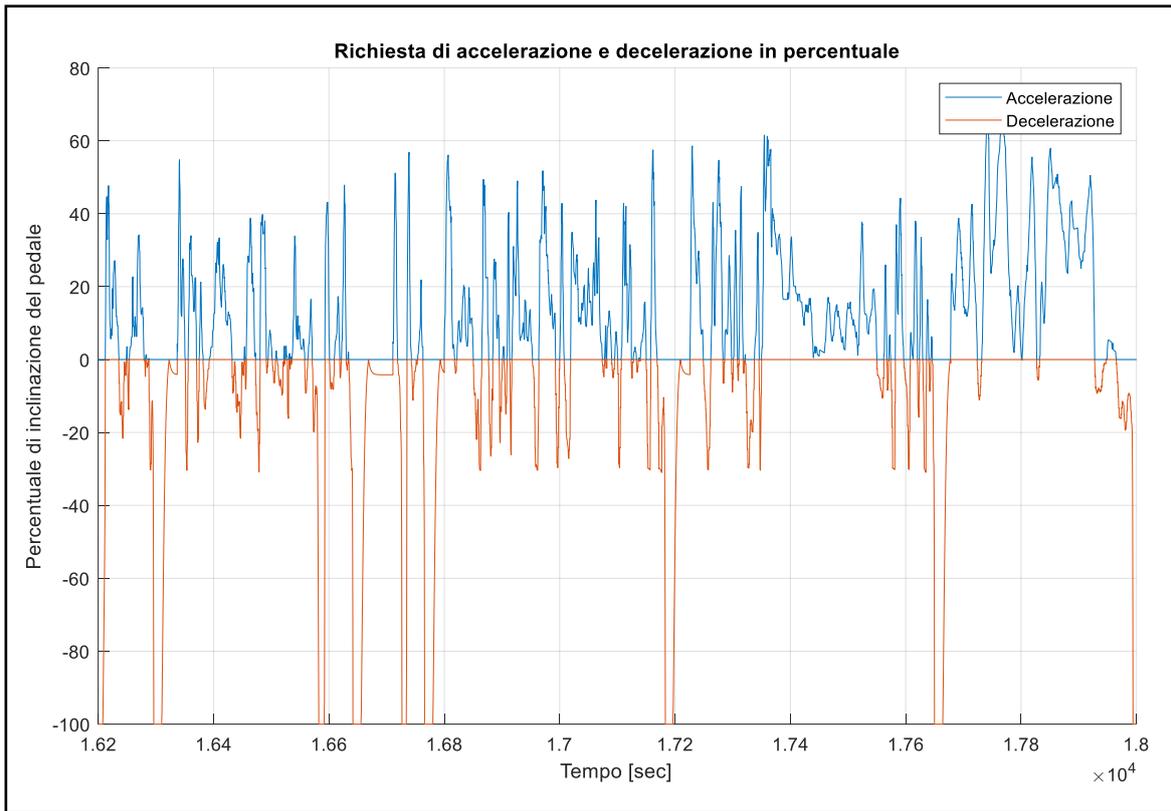


Figura 69 - Richiesta di accelerazione e decelerazione per il decimo ciclo WLTP

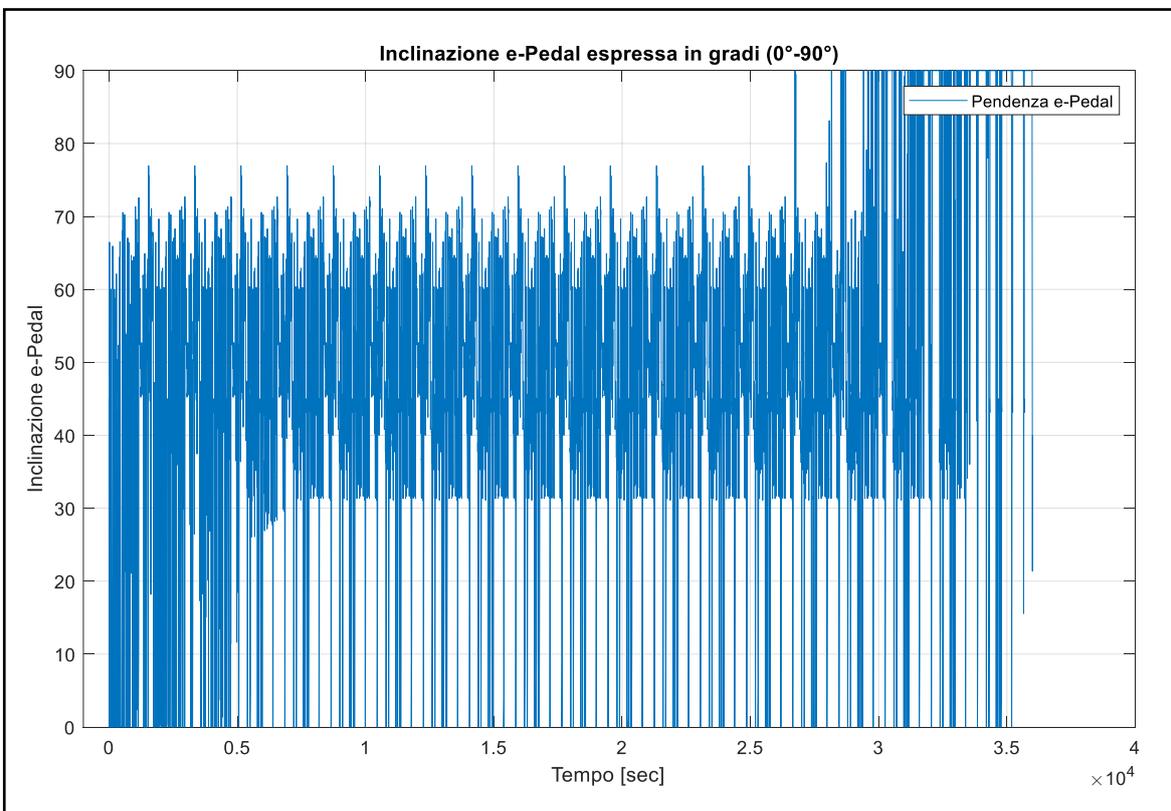


Figura 70 - Inclinazione dell'e-Pedal durante tutto il percorso

7.2.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice

Si mettono ora a confronto gli andamenti relativi alla coppia frenante richiesta dal conducente, e alla coppia rigeneratrice impiegata per ripristinare parte della carica residua della batteria. Sono quindi riportate in Figura 71 queste due funzioni, ed in particolare la curva blu indica la richiesta di coppia frenante, mentre la curva rossa rappresenta la massima intensità della coppia rigeneratrice di cui dispone il veicolo per la frenata rigenerativa.

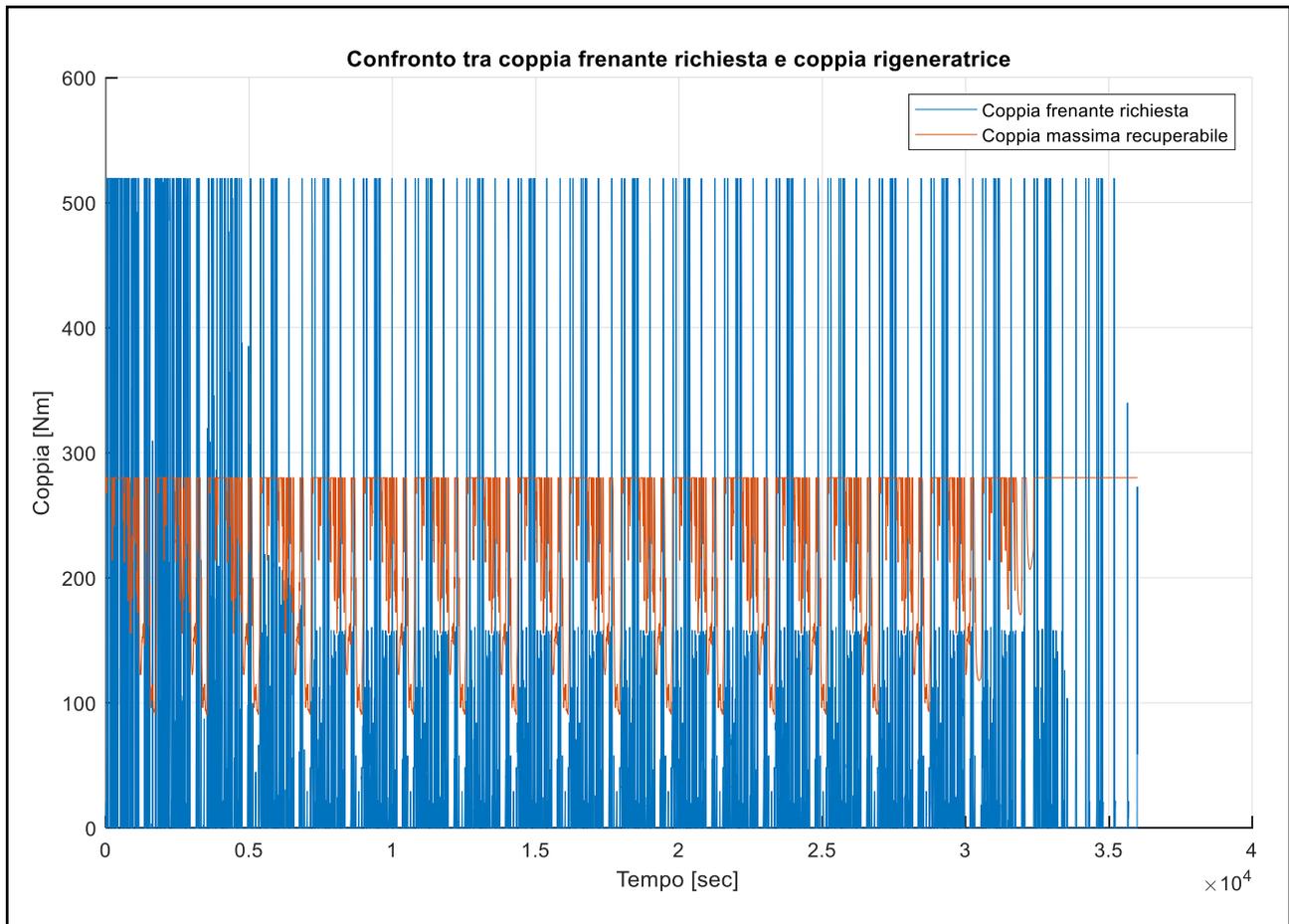


Figura 71 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia frenante rigenerativa massima

Come si evince dal grafico in Figura 72, la richiesta di coppia frenante richiesta dal conducente supera per piccoli intervalli di tempo la massima coppia rigeneratrice, e questo accade quando la velocità del veicolo scende al di sotto del limite minimo di soglia per l'attivazione della frenata rigenerativa, descritto in precedenza nella lookup table relativa alla velocità (pari a 2 m/s), innalzando la coppia frenante richiesta al massimo delle proprie possibilità, ma senza successo, dato che il freno dissipativo non è presente, e quello rigenerativo non è attivo in questi brevi intervalli temporali.

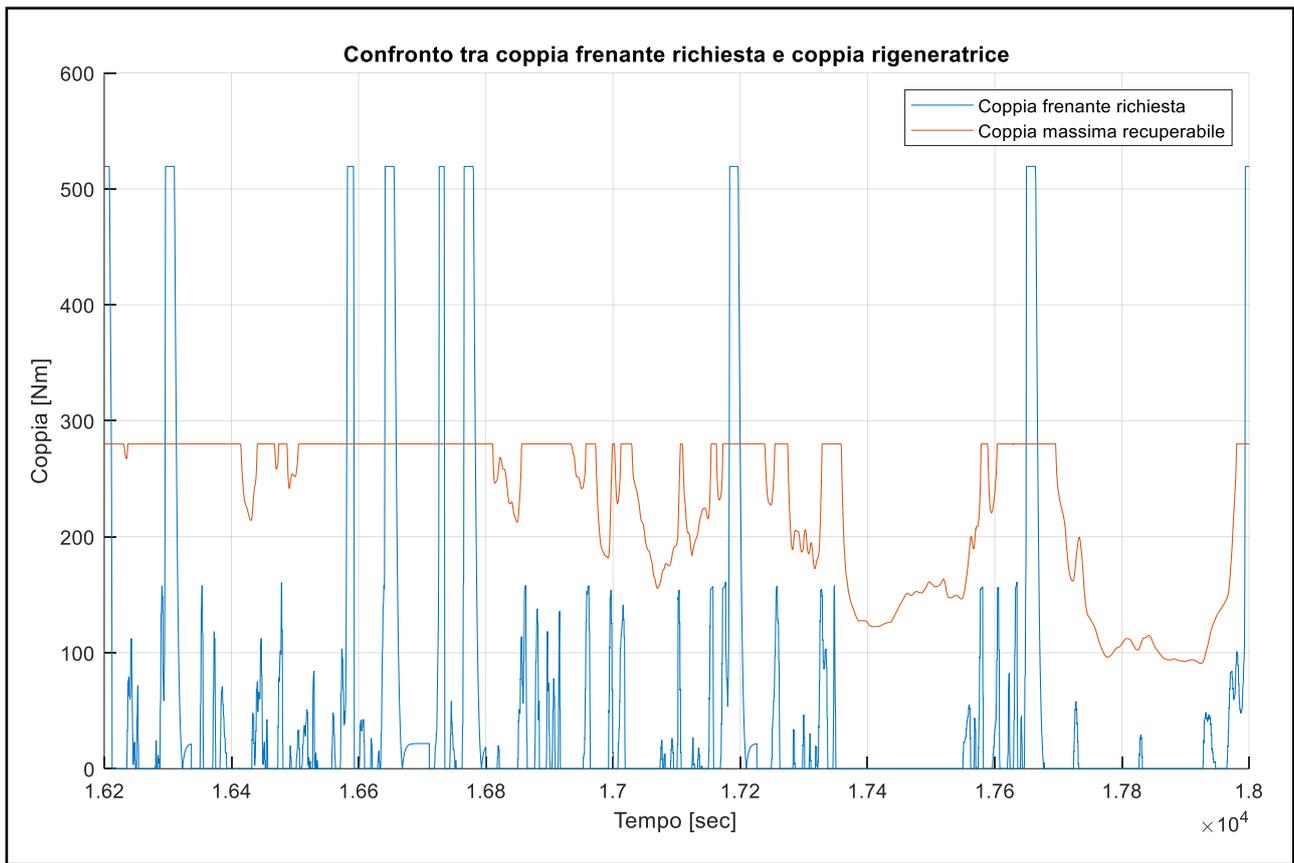


Figura 72 – Coppia frenante richiesta e coppia rigenerativa per il decimo ciclo WLTP

7.2.4 – Coefficiente globale di rigenerazione

Si analizza ora il coefficiente globale di rigenerazione, che presenta un andamento molto simile a quello visto anche in precedenza, ad eccezione del fatto che il tempo impiegato per raggiungere un valore unitario per la prima volta, risulta maggiore rispetto a quello visto per la prova 1. Nello specifico, il tempo necessario per raggiungere l'80% di state of charge, partendo dalla condizione di progetto di carica massimo (100%), risulta aumentato rispetto alla prova 1. Si ricorda che il raggiungimento dell'80% dello state of charge, corrisponde al raggiungimento del valore unitario del coefficiente di rigenerazione legato a tale parametro, e che condiziona profondamente le prime fasi del percorso, limitando la coppia rigenerata.

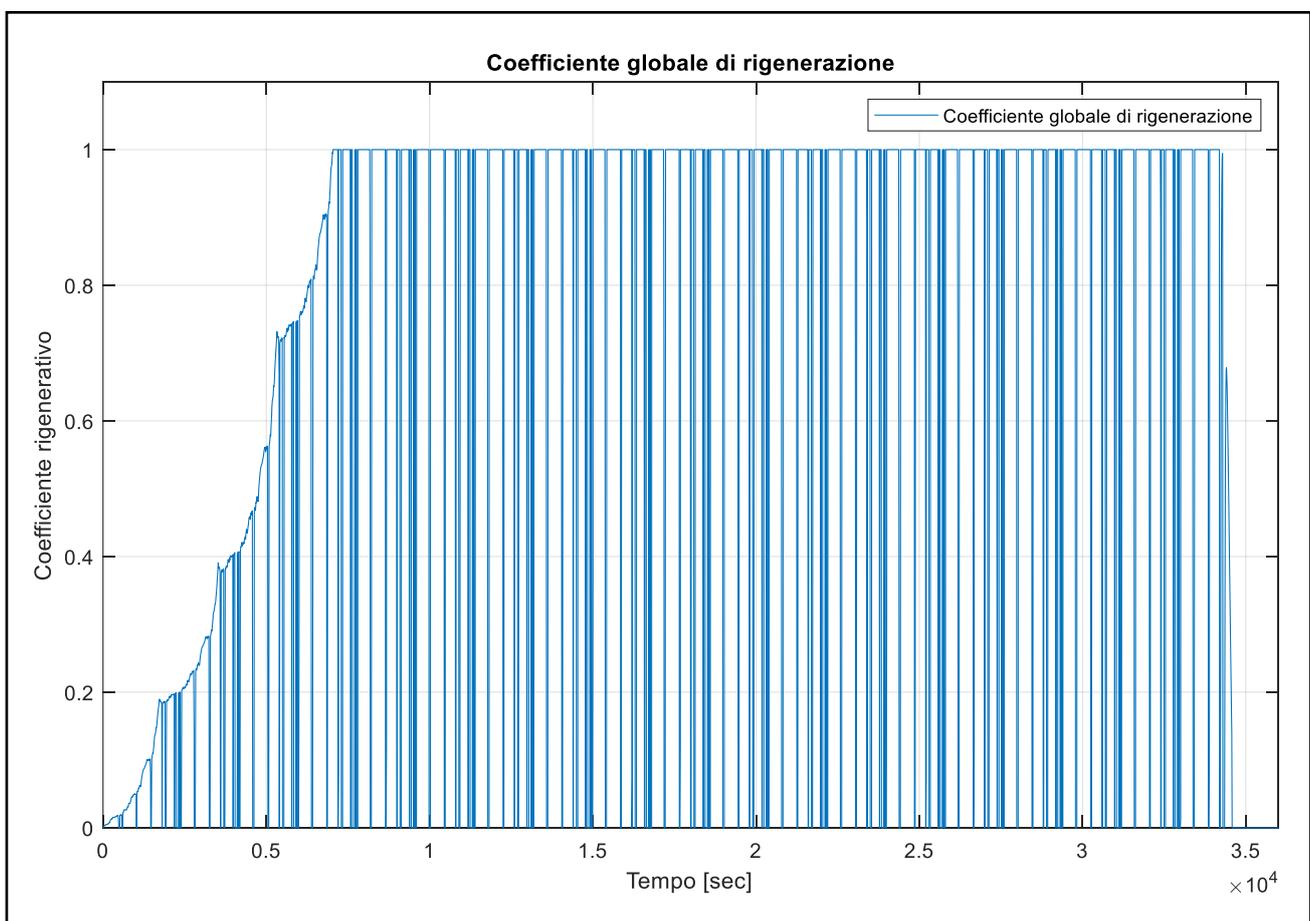


Figura 73 – Coefficiente globale di rigenerazione

7.2.5 – Coppia frenante rigeneratrice

Come precedentemente esposto per la prova 1, per la determinazione della coppia rigeneratrice che effettivamente verrà impiegata durante la fase di decelerazione, si moltiplica il coefficiente rigenerativo globale di Figura 73, per il valore minimo tra la coppia frenante richiesta e la coppia massima rigeneratrice, descritta dalla curva blu di Figura 74. Il tutto moltiplicato per il fattore correttivo 0,8, descritto nelle ipotesi di base di questa simulazione. Si ottiene quindi la curva rossa rappresentata in Figura 74.

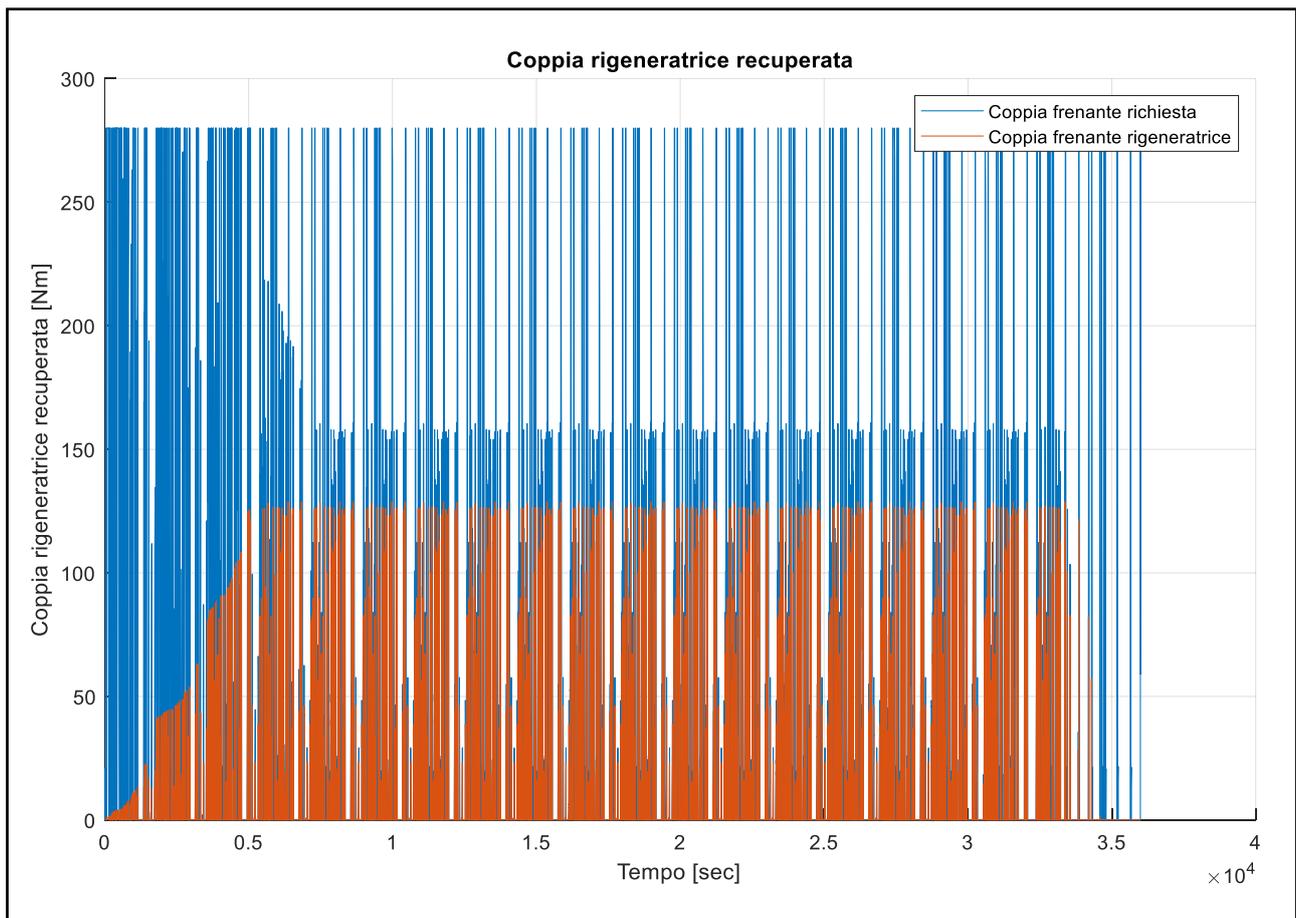


Figura 74 – Coppia frenante rigeneratrice effettiva

Si nota infatti come l'andamento della coppia rigeneratrice sia proporzionale all'andamento del coefficiente globale di rigenerazione descritto nel passaggio precedente, specie per i primi cicli WLTP del percorso, in cui il livello di state of charge della batteria è ancora elevato, e non consente una adeguata rigenerazione, a causa dei dati contenuti nelle lookup table.

Come si evince dagli andamenti riportati in Figura 74, e visti nel dettaglio in Figura 75, ci sono molti intervalli in cui la sola coppia rigeneratrice non è in grado di fornire tutta la

decelerazione richiesta dal conducente. In questi intervalli, la restante coppia frenante che viene richiesta dal conducente, dovrà essere fornita dal sistema frenante tradizionale (dissipativo), che però non è presente in questa configurazione.

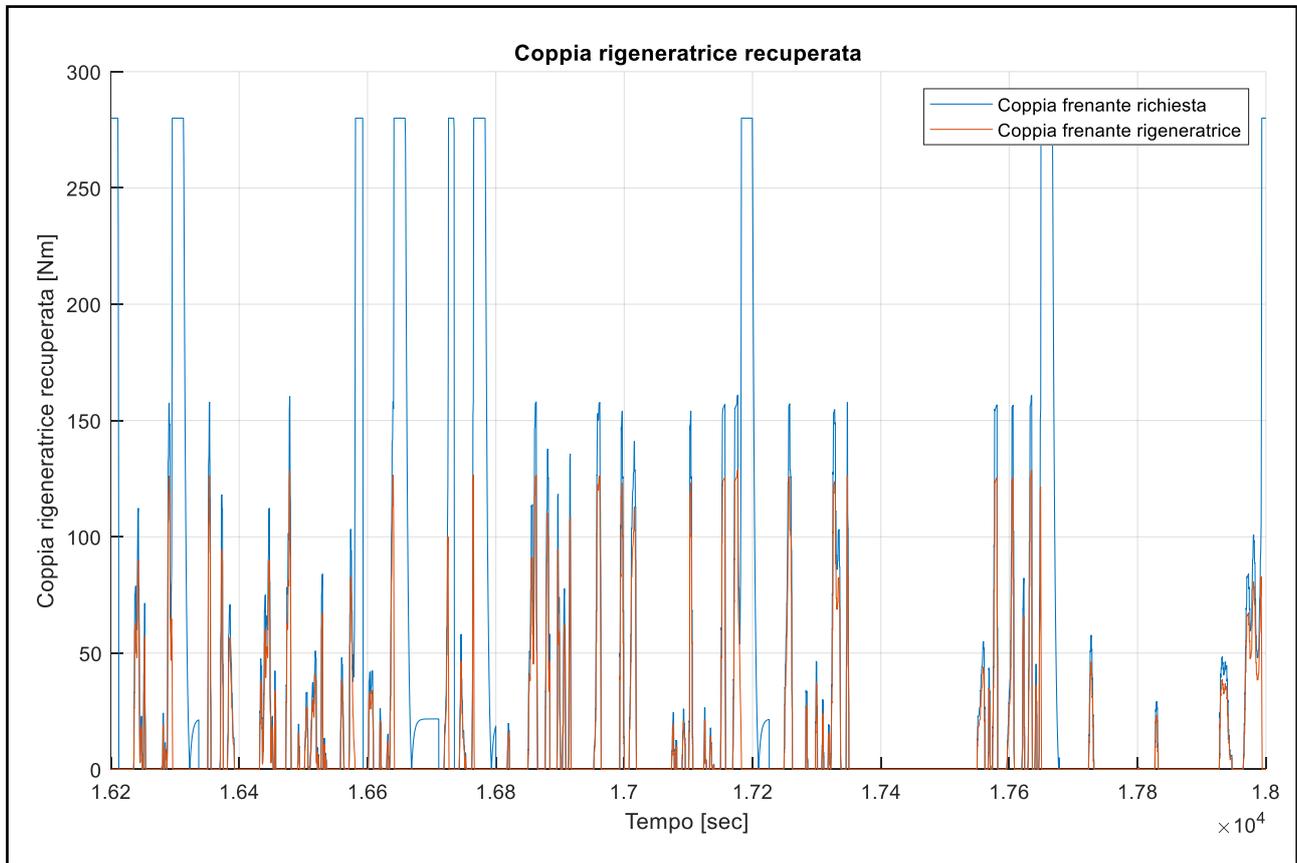


Figura 75 – Coppia frenante rigenerativa effettiva per il decimo ciclo WLTP

7.2.6 – Coppia frenante dissipativa

Come appena descritto, viene di seguito mostrato in Figura 76 l'andamento che dovrebbe assumere la coppia dissipativa tradizionale (se fosse inclusa nella logica), per fare in modo che il veicolo rispetti il profilo di velocità definito in partenza.

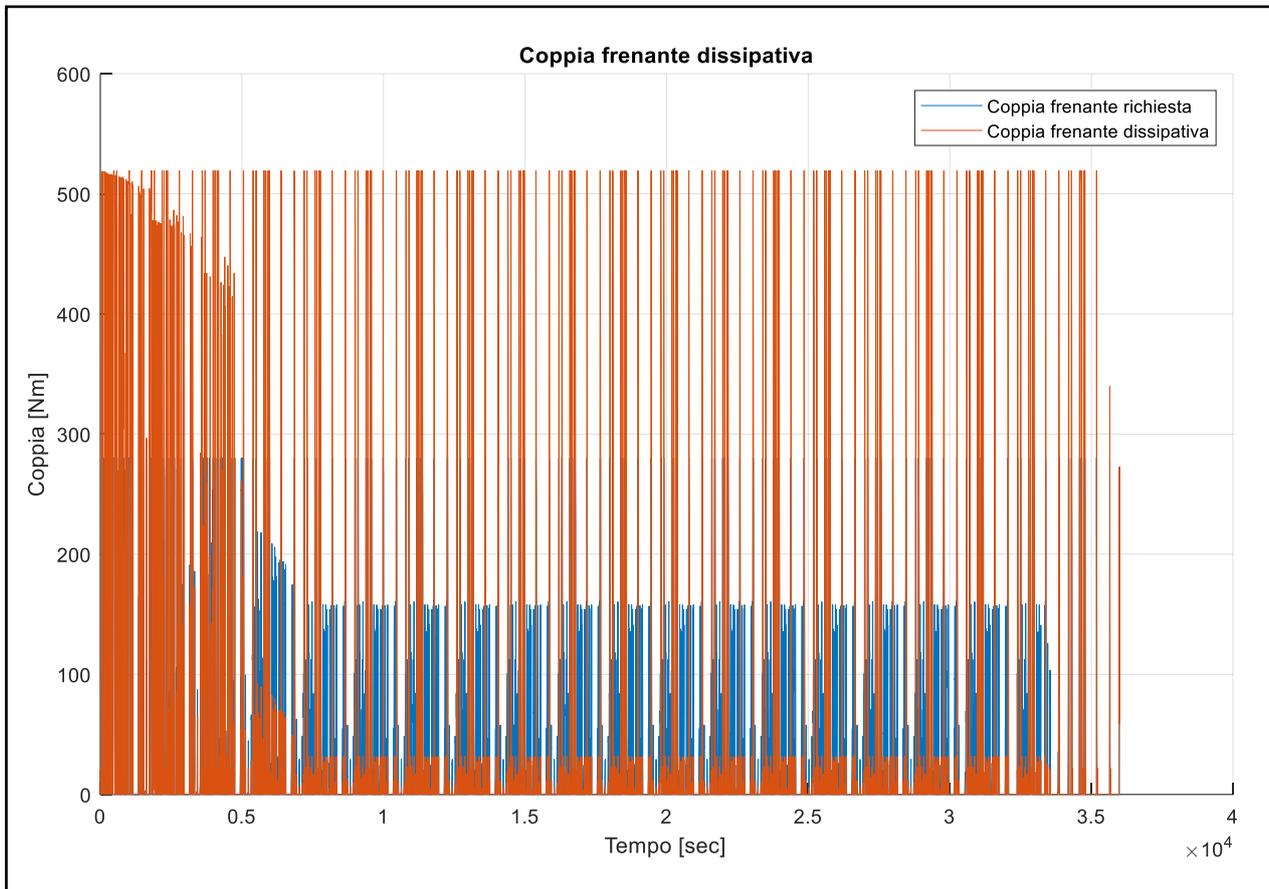


Figura 76 – Andamento della coppia dissipativa

La curva rossa descrive la coppia frenante dissipativa che dovrebbe essere fornita in aggiunta alla coppia frenante rigeneratrice, per garantire una decelerazione adeguata a soddisfare la richiesta del conducente. Tale profilo di coppia non è altro che la differenza tra coppia frenante richiesta dal conducente e la coppia frenante rigeneratrice che il veicolo è in grado di erogare. Infatti si notano dei picchi nelle prime fasi del percorso, dove la coppia frenante rigenerativa è ancora al minimo (come riportato in Figura 74), così come nelle fasi finali del percorso è richiesta unicamente la coppia frenante dissipativa (che però è disabilitata).

Viene infine mostrato in Figura 77 l'andamento della coppia frenante dissipativa con la curva rossa, rispetto alla coppia frenante richiesta, rappresentata dalla curva blu.

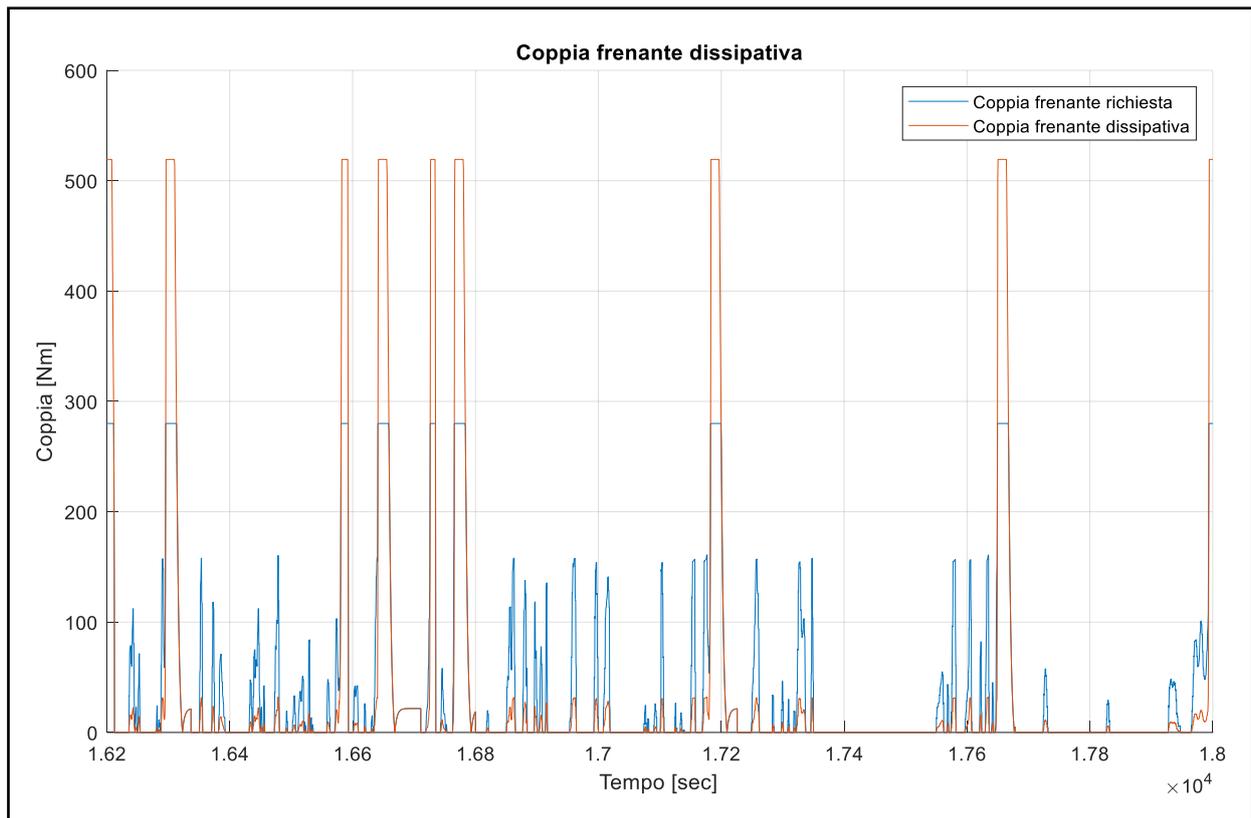


Figura 77 – Dettaglio dell'andamento della coppia dissipativa per il decimo ciclo WLTP

7.2.7 – State of charge

Il grafico dello state of charge rappresentato in Figura 78 mostra l'andamento della carica residua della batteria del veicolo durante tutto il percorso, con un valore iniziale pari al 100%, fino all'arresto della vettura. Anche in questo grafico, come in quello della prova 1, vi è una diminuzione dello state of charge che si ripete ciclicamente, con lo stesso andamento, per ogni ciclo WLTP percorso, fino all'esaurimento totale della batteria. Anche in questo caso, si nota un'anomalia, presente negli ultimi tratti del percorso, per valori inferiori al 5% dello state of charge, in cui l'andamento dello stesso non rispecchia quello visto nei cicli precedenti, a causa del basso livello di carica residua della batteria. Nello specifico, il livello di state of charge pari al 2% viene raggiunto al secondo 32289, rispetto ai 30383 secondi della prova 1, quindi con un incremento dell'autonomia di 24,62 km.

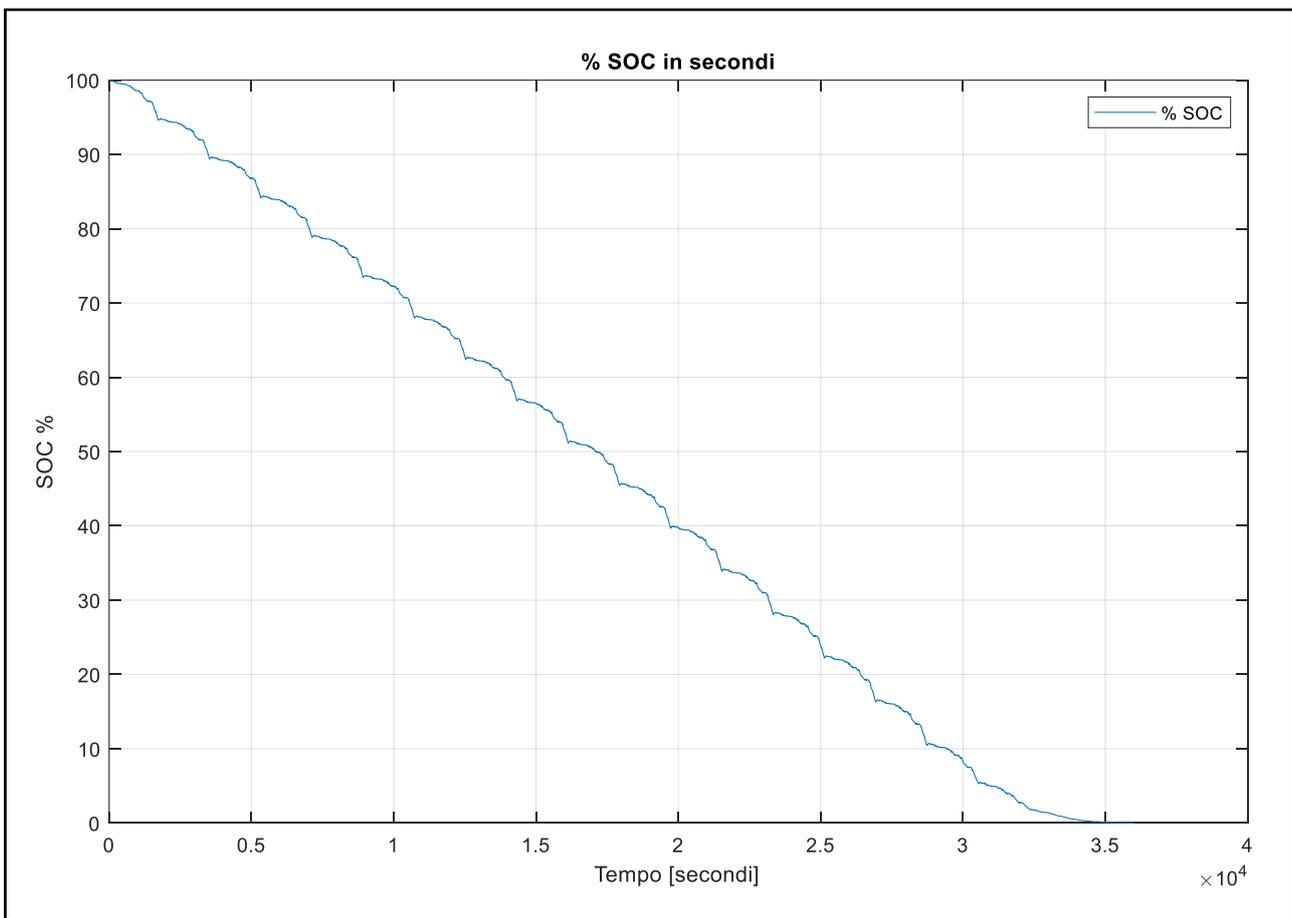


Figura 78 – Andamento dello state of charge

7.2.8 – Conclusioni relative alla prova 2

La seconda prova nel complesso, ha dimostrato che eliminando la frenata tradizionale dissipativa, la sola coppia rigenerativa non è sufficiente per decelerare quanto richiesto dal conducente. Questo evento si è verificato troppo frequentemente affinché il veicolo potesse seguire coerentemente il profilo di velocità del ciclo WLTP, ed infatti non riesce ad eseguire i comandi impartiti dal conducente, non garantendo una sicurezza e affidabilità adeguata.

Infatti, si è visto come la coppia rigeneratrice che era possibile utilizzare per la decelerazione della vettura non era sufficiente, e veniva quindi generata una richiesta supplementare di coppia frenante che però non poteva essere soddisfatta, dato che non era presente l'impianto frenante dissipativo.

Per questo motivo, l'incremento dell'autonomia pari a 24,62 km, non deve trarre in inganno in quanto dato positivo, dato che il profilo di velocità per molti tratti del percorso non è stato rispettato, falsificando di fatto la prova.

Pertanto, si può ritenere questa configurazione non valida ai fini dell'implementazione su un veicolo reale, dato che non sarebbe in grado di rispondere coerentemente alle richieste del conducente, non garantendo la sicurezza dei passeggeri.

7.3 – Prova 3

La terza prova prevede una modifica ai parametri del modello Simulink secondo quanto segue:

- La logica del sistema e-Pedal è abilitata;
- I freni tradizionali, ovvero quelli dissipativi sono abilitati;
- Il coefficiente di riduzione della frenata rigenerativa è pari a 0.8.

In questa nuova simulazione, vengono presi in esame i coefficienti derivanti dalle lookup table relative alla velocità del veicolo e all'intensità della decelerazione, a differenza della prima e della seconda prova, in cui venivano trascurati. Vengono abilitati i freni tradizionali, che verranno attivati solo nel caso in cui la coppia frenante rigeneratrice non sia sufficiente ad eguagliare la coppia frenante totale richiesta dal conducente in fase di decelerazione. Inoltre, la coppia rigenerativa che effettivamente verrà esercitata dal veicolo, verrà ulteriormente diminuita del 20%, a causa del coefficiente moltiplicativo pari a 0,8.

Ci si aspetta quindi una diminuzione dell'autonomia del veicolo, dato che l'implementazione della logica dell'e-Pedal comporta l'introduzione di due ulteriori coefficienti rigenerativi, compresi tra zero ed uno, che limiteranno la coppia rigeneratrice, con diminuzione del recupero di energia in fase di decelerazione.

7.3.1 – Analisi del profilo di velocità

Il primo grafico che viene analizzato in Figura 79 per la terza simulazione, riporta il confronto tra i profili di velocità del ciclo WLTP e della velocità simulata dal modello: la curva blu indica ancora una volta il ciclo WLTP da rispettare, mentre la curva rossa indica il profilo di velocità che viene seguito dal veicolo durante la simulazione. Da questo primo confronto, si nota che l'andamento del profilo di velocità di riferimento viene seguito coerentemente per un numero di cicli inferiore rispetto a quelli seguiti durante la prima e la seconda prova, con un distacco dal ciclo WLTP già a partire dal quindicesimo ciclo, dato che lo state of charge presenta valori troppo bassi per consentire al veicolo di raggiungere le velocità di riferimento. Nello specifico, in Figura 80 si nota come l'andamento del profilo di velocità inizia a non corrispondere a quello della normativa, già a partire dal quindicesimo ciclo.

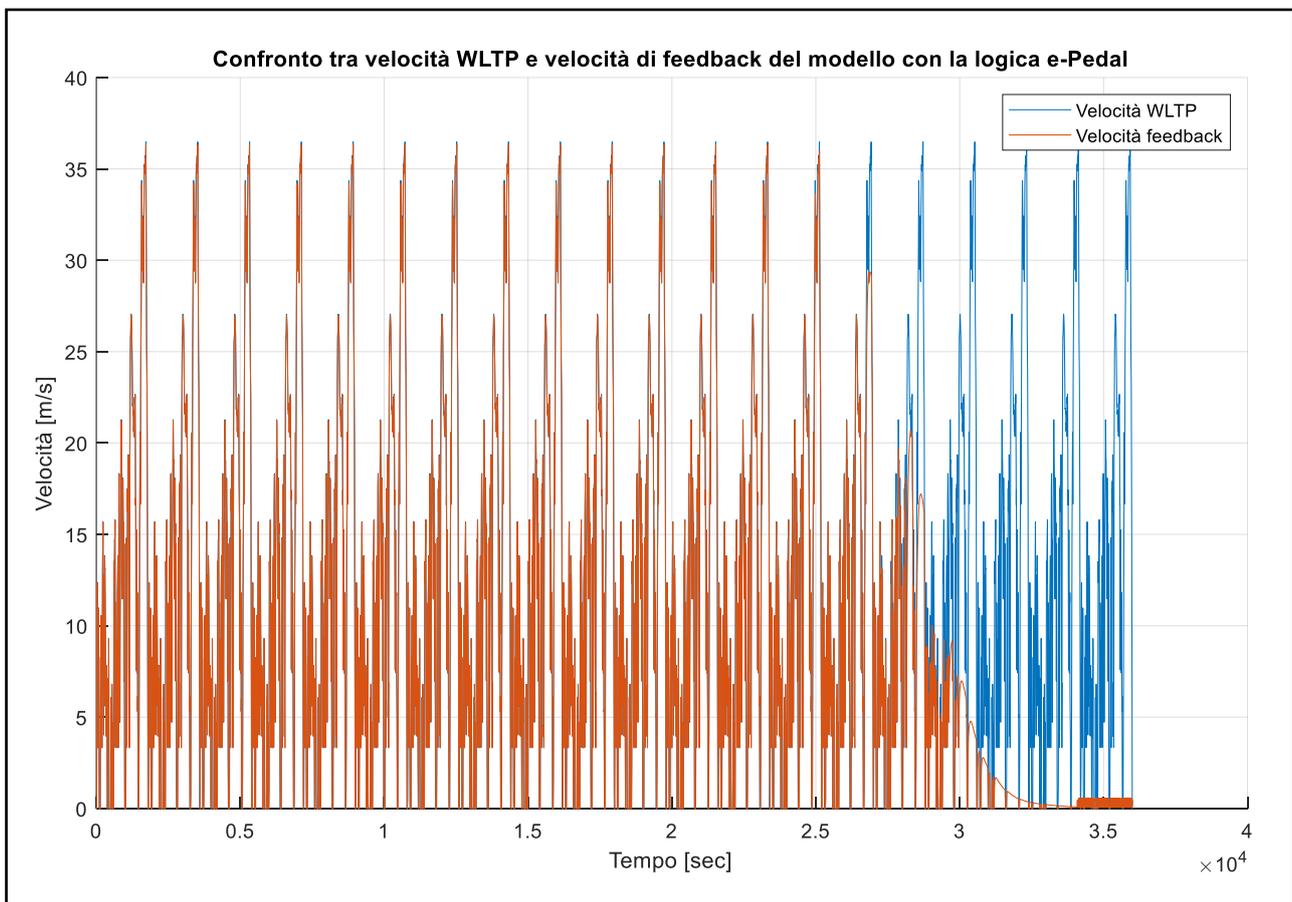


Figura 79 – Andamento dei profili di velocità della normativa e del modello Simulink

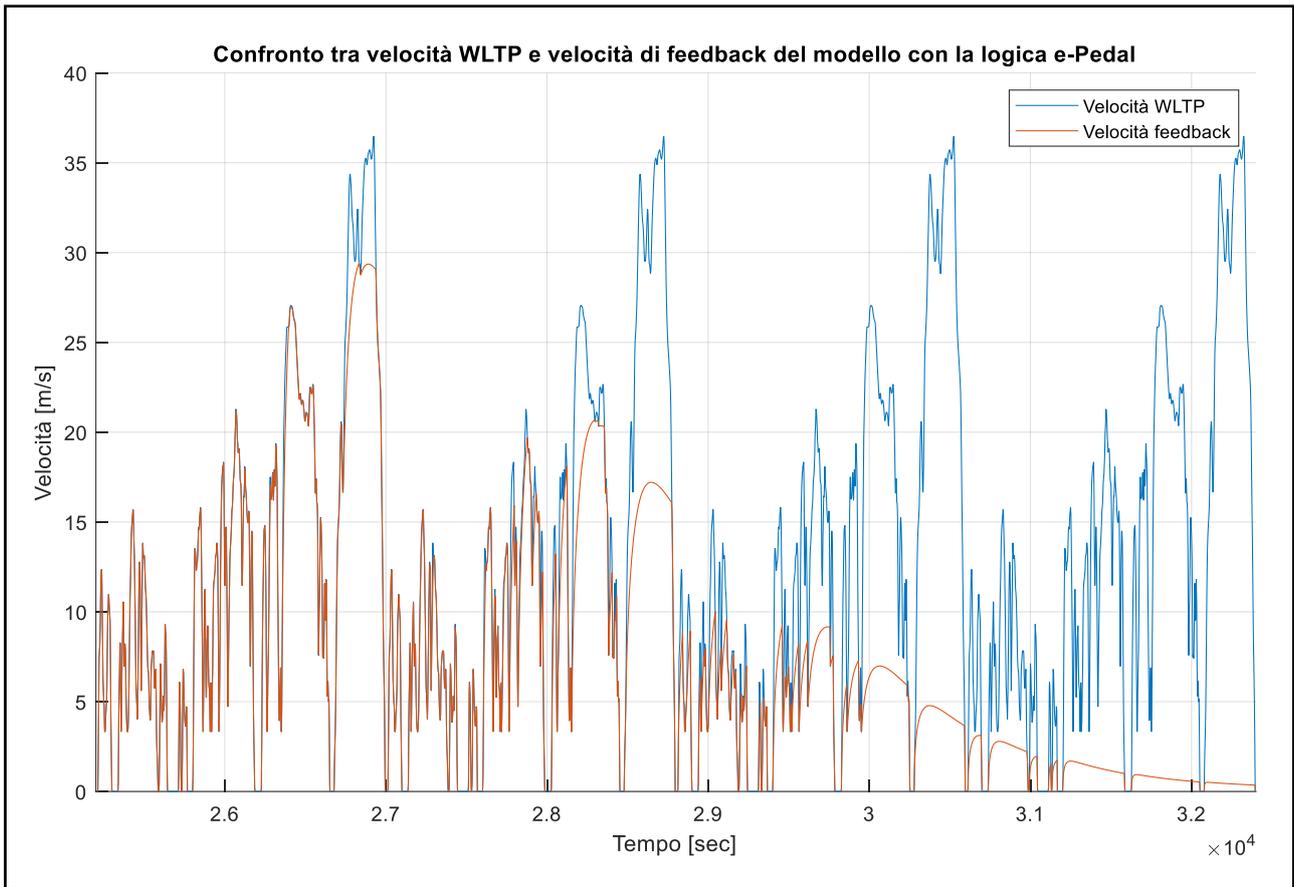


Figura 80 – Andamento del profilo di velocità sugli ultimi cicli WLTP

7.3.2 – Richiesta di accelerazione e frenata

Vengono ora analizzate le richieste di coppia motrice e di coppia frenante, derivanti dall'elaborazione dei parametri di ingresso della velocità WLTP e della velocità di feedback, per tutta la durata del percorso, pari a 20 cicli WLTP: la curva blu indica le fasi di accelerazione, mentre la curva rossa indica le fasi di decelerazione.

L'andamento generale della curva dell'accelerazione (curva blu), in questa nuova configurazione è molto simile a quello visto nel primo caso analizzato (prova 1), sia per quanto riguarda i valori di picco, sia per l'andamento che esso presenta. Al contrario, l'andamento generale relativo alla curva della decelerazione è anch'esso simile a quello riportato nella prova 1, e nello specifico, in questa nuova configurazione si raggiunge una condizione di regime dopo solamente 3 cicli WLTP, a differenza dei 4 cicli visti nella prima configurazione (prova 1). Non si riporta l'andamento di un solo ciclo WLTP a regime, dato che sarebbe lo stesso di quello visualizzato in Figura 47, relativa alla prova 1.

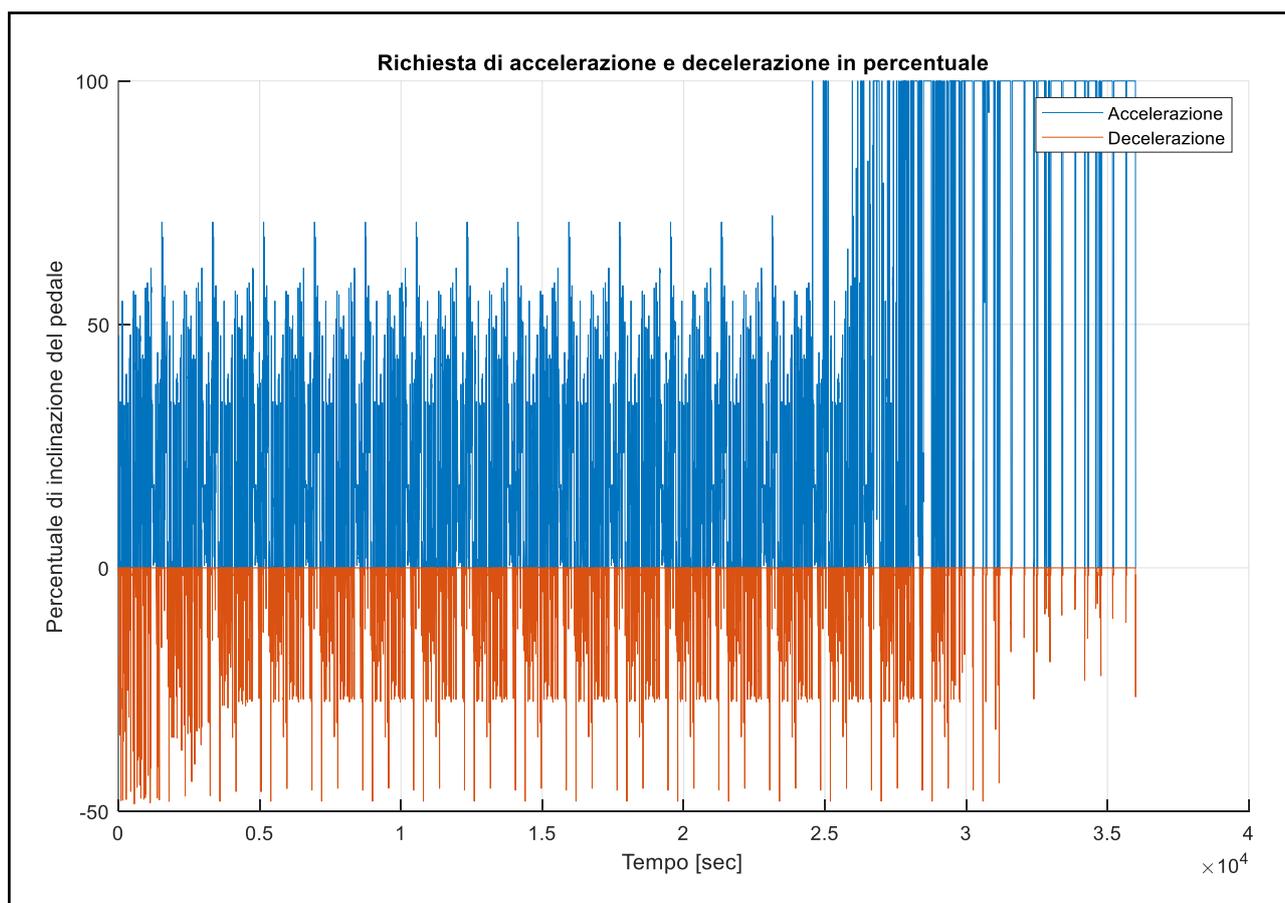


Figura 81 – Richiesta di accelerazione e decelerazione per il percorso completo

7.3.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice

Si mettono ora a confronto gli andamenti relativi alla coppia frenante richiesta dal conducente, e alla coppia frenante rigeneratrice massima applicabile dal veicolo.

Sono quindi riportate in Figura 82 queste due funzioni, ed in particolare la curva blu indica la coppia frenante richiesta dal conducente, mentre la curva rossa rappresenta la massima intensità della coppia rigeneratrice di cui dispone il veicolo per la frenata rigenerativa. Si nota che questo confronto assume lo stesso andamento visto per la prova 1, con gli stessi profili e con gli stessi valori in modulo, come mostrato nel dettaglio in Figura 83.

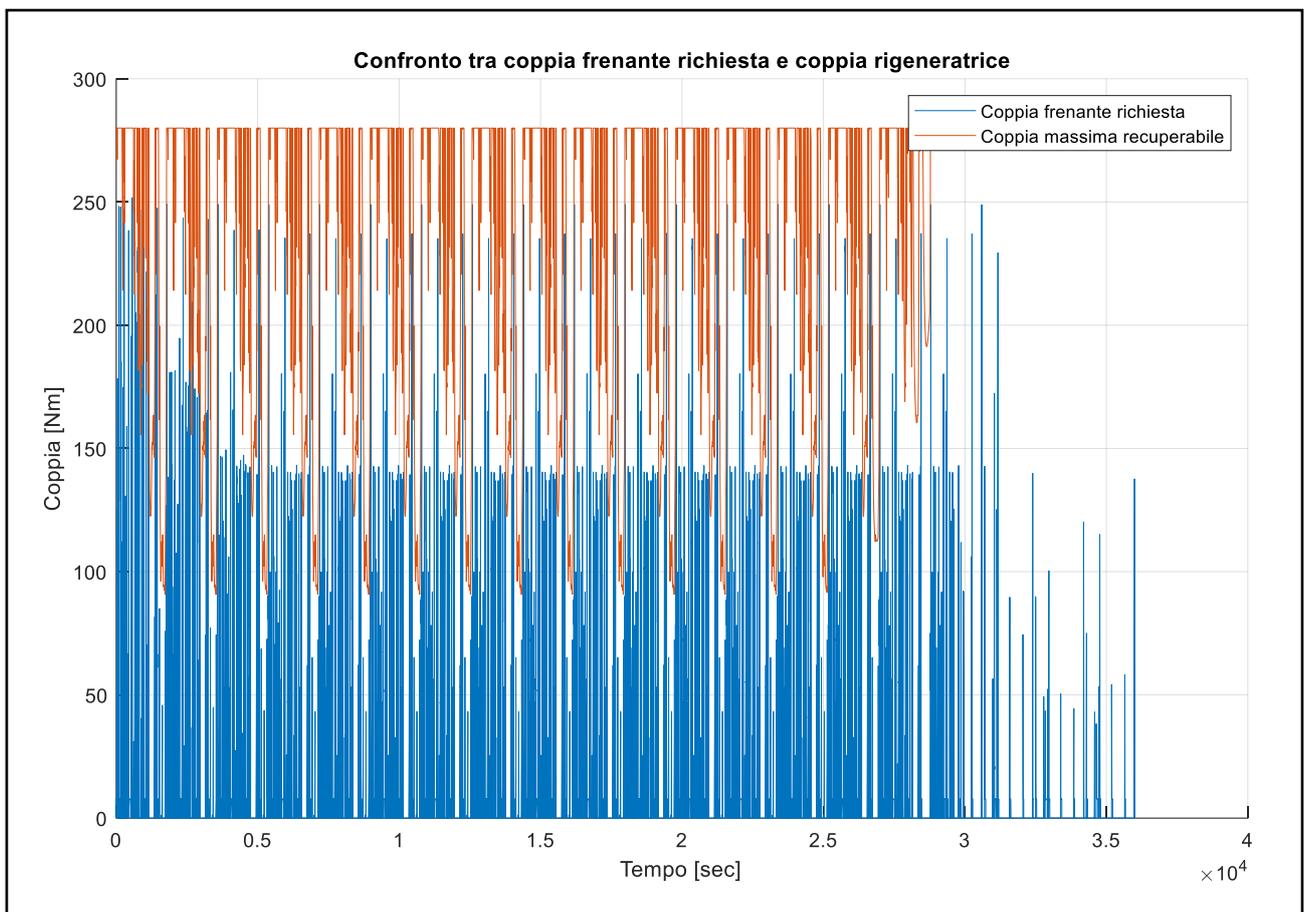


Figura 82 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia massima rigeneratrice

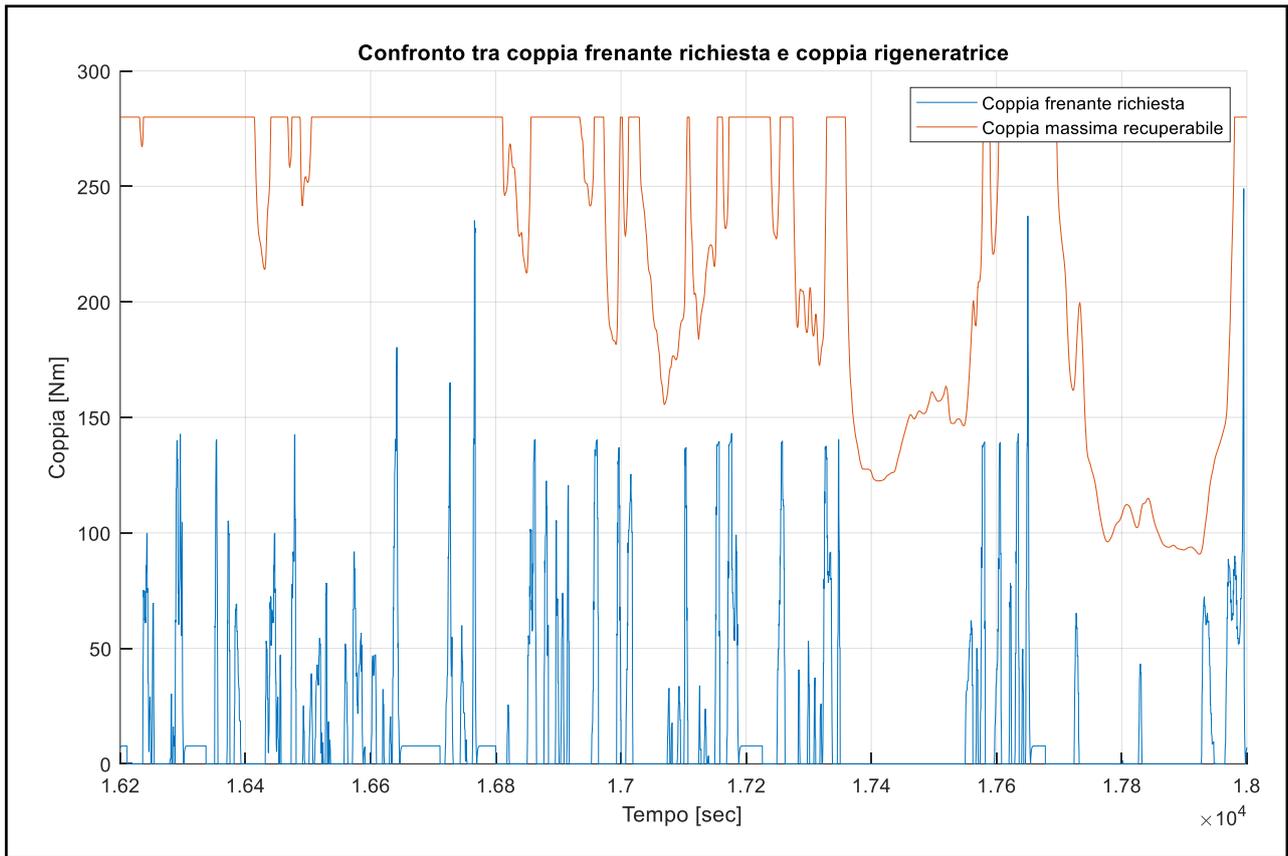


Figura 83 – Confronto tra coppie frenanti del decimo ciclo WLTP

7.3.4 – Coefficiente globale di rigenerazione

Si analizza ora il coefficiente globale di rigenerazione rappresentato in Figura 84, che presenta un andamento molto simile a quello riportato nella prova 1, in Figura 60, con un incremento progressivo, che riprende lo stesso profilo della lookup table relativa allo state of charge.

Nella prima parte del percorso, ovvero per i primi tre cicli WLTP, il coefficiente globale di rigenerazione riprende lo stesso andamento mostrato dal coefficiente di rigenerazione legato allo state of charge, per poi assumere un andamento ciclico, una volta raggiunta la condizione di regime.

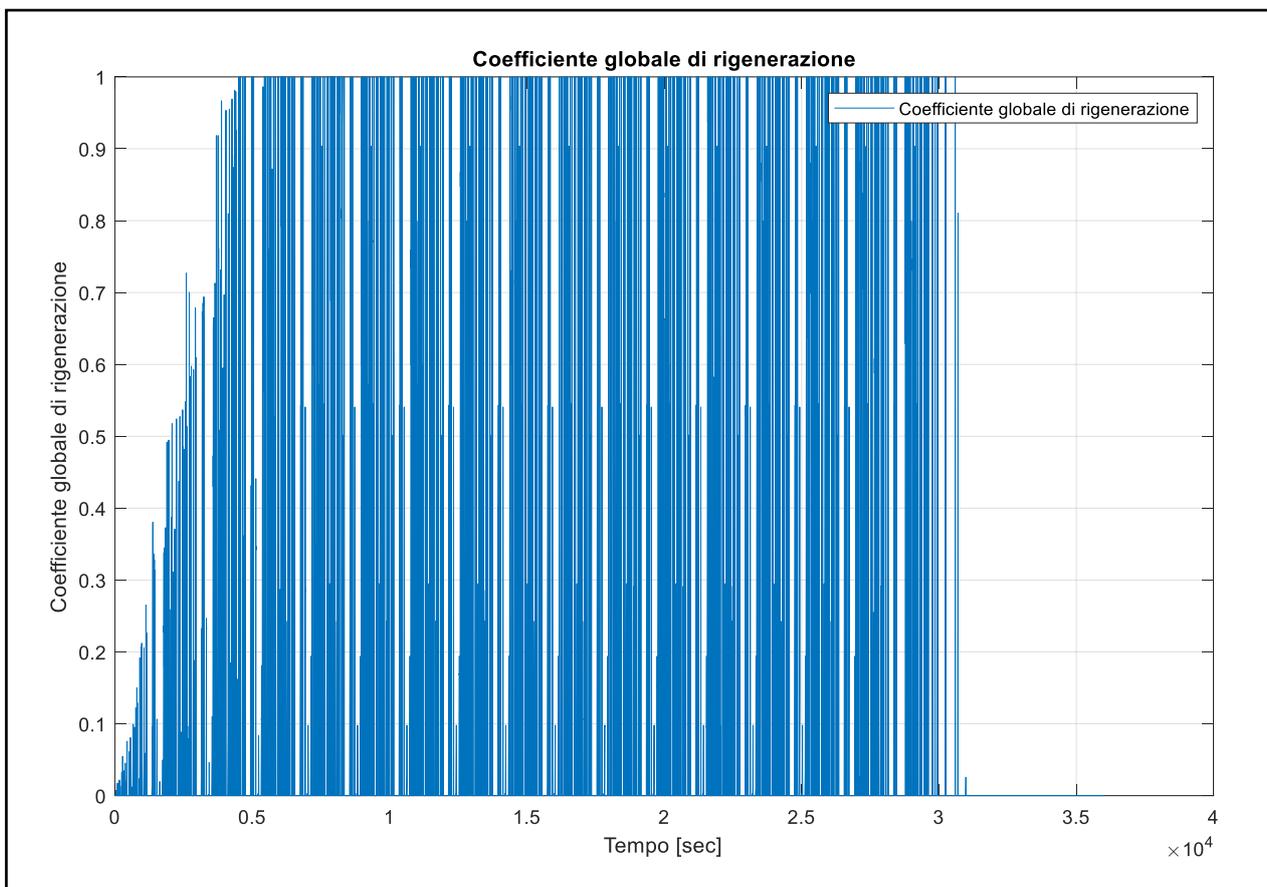


Figura 84 – Coefficiente globale di rigenerazione

Si ricorda inoltre che anche in questo caso il coefficiente rigenerativo globale, viene processato con un saturatore, che limita il suo valore tra gli intervalli zero ed uno.

7.3.5 – Coppia frenante rigeneratrice

La coppia frenante rigenerativa mostrata in Figura 85, presenta lo stesso andamento riportata nella prova 1, dato che dipende dal coefficiente globale di rigenerazione, e dal minimo tra la coppia massima rigenerabile e la coppia frenante richiesta, che sono tutti simili al primo caso analizzato. L'unica differenza che si può riscontrare, è dovuta al fatto che si raggiunge la condizione di regime in soli tre cicli WLTP, mentre nella prova 1 ne occorrono quattro.

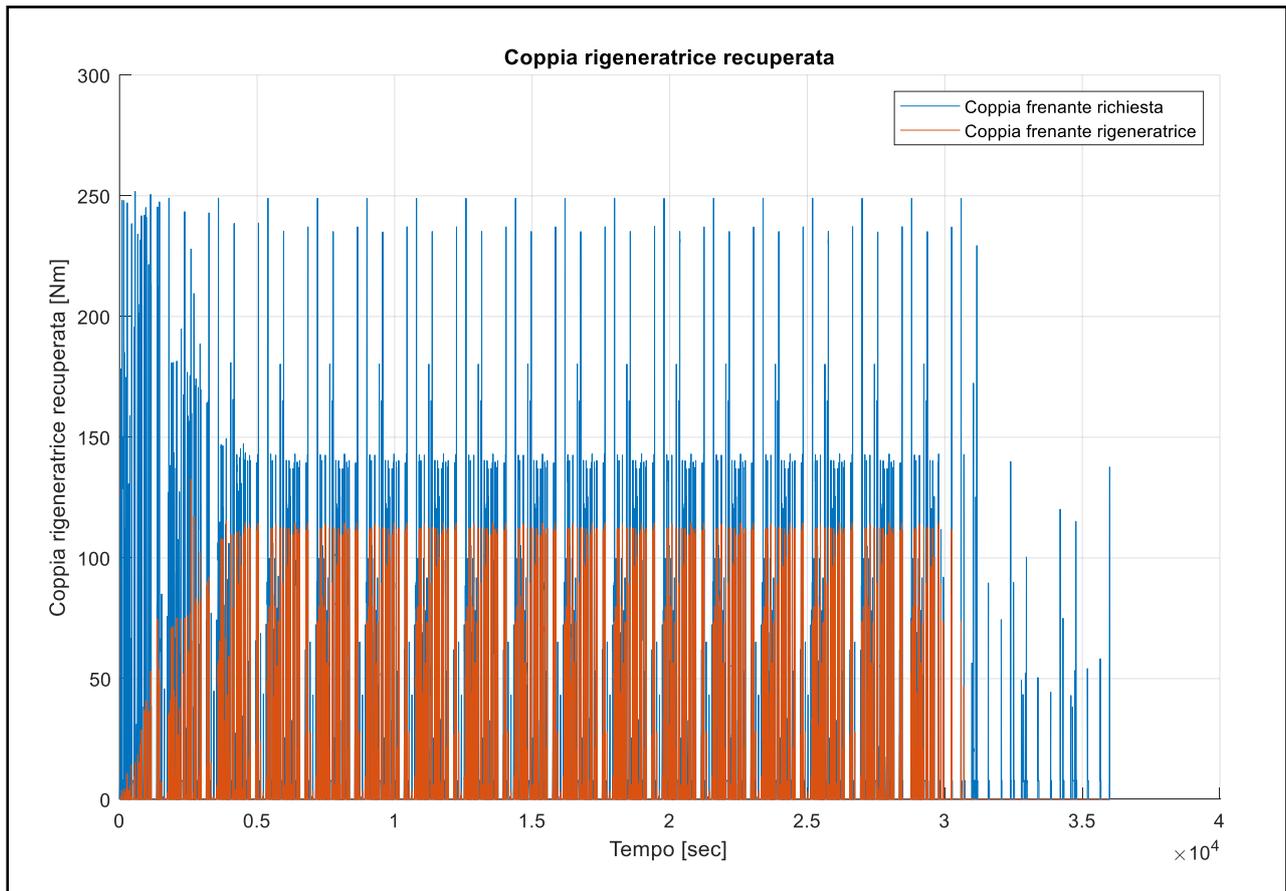


Figura 85 – Coppia frenante rigenerativa

Le considerazioni che possono essere fatte, sono anch'esse analoghe a quelle riportate nella prova 1, ovvero che nei primi cicli WLTP, la coppia rigenerativa è nettamente inferiore a quella richiesta, dato che il coefficiente rigenerativo legato allo state of charge in quell'intervallo è molto basso; allo stesso modo, per gli ultimi cicli WLTP del percorso, il valore della coppia frenante rigenerativa è basso, se non nullo, dato che sia il coefficiente rigenerativo relativo alla decelerazione, sia il coefficiente legato alla velocità del veicolo, sono molto piccoli. Inoltre per la condizione di regime, si nota come l'andamento della coppia rigeneratrice sia uguale a quello della coppia richiesta, a meno del fattore moltiplicativo 0,8.

7.3.6 – Coppia frenante dissipativa

Viene di seguito mostrato in Figura 86 l'andamento della coppia frenante dissipativa elaborata dal modello, che presenta anch'essa lo stesso andamento della prova 1, dato che i parametri da cui dipende (e che sono già stati messi a confronto con la prova 1) sono anch'essi simili.

Nello specifico, vengono mostrati i profili relativi alla coppia frenante richiesta dal conducente con la curva blu, mentre con la curva rossa viene mostrato il profilo della coppia dissipativa che deve essere fornita in aggiunta a quella rigenerativa per effettuare correttamente la fase di decelerazione.

Infatti, secondo la logica dell'e-Pedal, la coppia frenante dissipativa deve intervenire solo nel caso in cui la frenata rigenerativa non sia sufficiente a far decelerare il veicolo in base a quanto richiesto. Analizzando nel dettaglio la coppia frenante dissipativa, si nota come essa coincida con l'andamento della coppia frenante richiesta dal conducente nelle fasi iniziali del percorso, e viene in generale visualizzata come sovrapposta a quest'ultima.

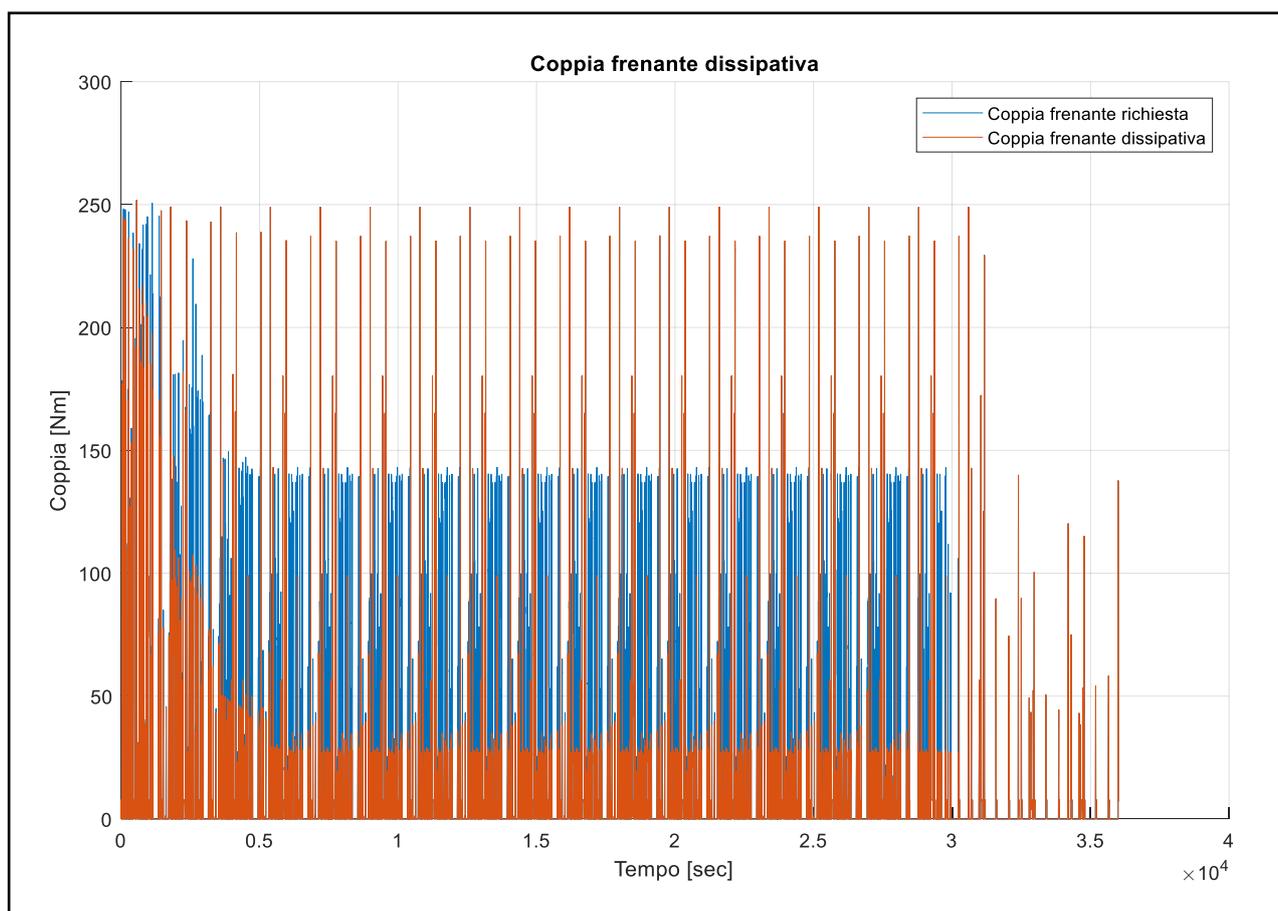


Figura 86 – Coppia frenante dissipativa

7.3.7 – State of charge

Il grafico dello state of charge presente in Figura 87, mostra la ripetizione ciclica del percorso WLTP, partendo con un livello di carica della batteria pari al 100%, come condizione di progetto, e raggiungendo un valore pari al 2% dopo 28.751 secondi, ovvero quasi 80 ore di viaggio ininterrotto, più basso rispetto alla prova 1 come un valore stimato di 30.383 secondi, quindi con una diminuzione dell'autonomia.

Questo risultato è dovuto all'aggiunta di altre due condizioni all'interno della logica di gestione della frenata rigenerativa del sistema e-Pedal, che riducono il coefficiente globale di rigenerazione, con una conseguente diminuzione della coppia utilizzabile per la rigenerazione, che porta quindi ad una diminuzione dell'autonomia.

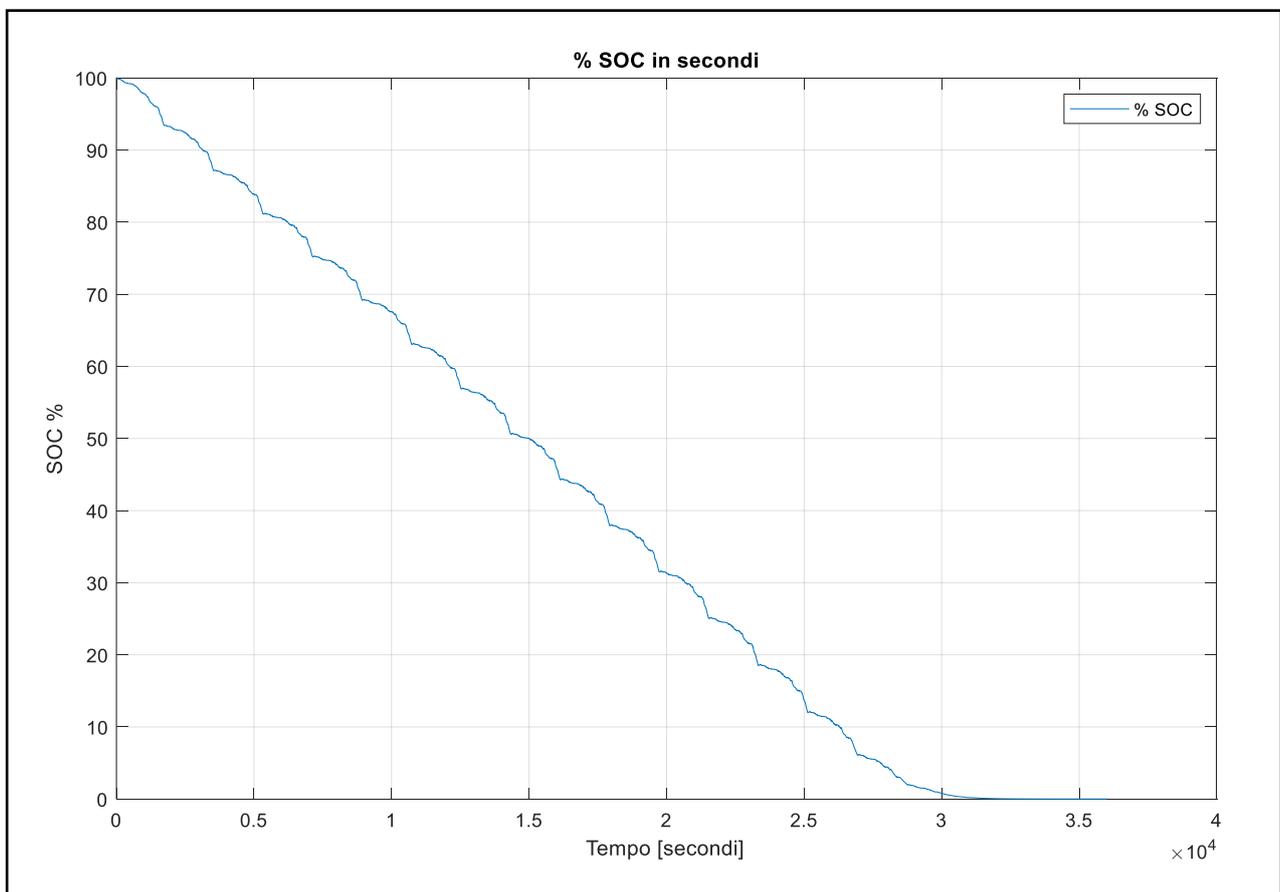


Figura 87 – Andamento dello state of charge

7.3.8 – Conclusioni relative alla prova 3

La prova 3 mostra dei risultati molto simili a quelli riportati nella prova 1, dato che la tecnologia della frenata rigenerativa è sempre attiva, così come la frenata dissipativa, mentre vengono introdotti due nuovi coefficienti di rigenerazione, ovvero due ulteriori condizioni per la valutazione della coppia rigeneratrice, che non alterano sostanzialmente il comportamento della vettura, ma ne modificano semplicemente l'autonomia, riducendola di 1.632 secondi, che corrispondono ad una diminuzione dell'autonomia di 21,08 km, sempre con riferimento alla prova 1.

Pertanto, si può affermare che la logica legata all'implementazione del sistema e-Pedal funziona correttamente, ma non riesce a garantire un incremento dell'autonomia come sperato, dato che vengono solamente introdotte due ulteriori condizioni (due nuovi coefficienti rigenerativi) che di fatto limitano ulteriormente la coppia rigeneratrice, e conseguentemente diminuiscono l'autonomia massima del veicolo, come anticipato nell'introduzione di suddetta prova.

7.4 – Prova 4

La quarta prova prevede una modifica ai parametri del modello Simulink secondo quanto segue:

- La logica del sistema e-Pedal è abilitata;
- I freni tradizionali, ovvero quelli dissipativi sono disabilitati;
- Il coefficiente di riduzione della frenata rigenerativa è pari a 0.8.

In questa nuova simulazione, vengono presi in considerazione i coefficienti derivanti dalle lookup table relative alla velocità di crociera del veicolo e all'intensità della decelerazione, dato che sono parte integrante della logica del sistema e-Pedal. Vengono disattivati i freni dissipativi tradizionali, quindi l'unico modo per ottenere una decelerazione è utilizzare la coppia frenante rigeneratrice, che anche in questo caso viene limitata dal coefficiente moltiplicativo fissato a 0,8.

I risultati derivanti da questa simulazione possono essere confrontati con quelli della prova 2 per mettere in evidenza le differenze tra un veicolo con la logica dell'e-Pedal implementata o di un veicolo senza tale logica, a parità di altre condizioni, oppure può si può effettuare un confronto tra la prova 4 e la prova 3, per evidenziare le differenze tra il caso in cui la frenata dissipativa è abilitata o meno, a parità delle altre condizioni.

Ci si aspetta quindi un incremento della richiesta di coppia frenante, dato che non essendo presente il sistema frenante dissipativo, tutta la richiesta di decelerazione dovrà essere soddisfatta dalla sola frenata rigenerativa. Di conseguenza, la coppia frenante richiesta sarà notevolmente superiore a quella massima recuperabile, per cui non si riuscirà a seguire coerentemente il ciclo WLTP di riferimento, specie nei tratti in cui si ha una rapida diminuzione della velocità, con il profilo di velocità della vettura simulata che tenderà ad assumere un andamento lineare, pari alla massima rigenerazione che il veicolo sarà in grado di fornire, oppure per quegli intervalli di tempo in cui la velocità è inferiore rispetto al limite minimo di soglia pari a 2 m/s.

7.4.1 – Analisi del profilo di velocità

Il primo grafico che viene analizzato per la quarta simulazione, riporta il confronto tra i profili di velocità del ciclo WLTP e della vettura simulata: la curva blu indica il ciclo WLTP di riferimento, mentre la curva rossa indica il profilo di velocità che viene seguito dal veicolo durante la simulazione. Da questo primo confronto, si nota dalla Figura 88 come, sia per il primo ciclo WLTP, che per gli ultimi quattro cicli, il profilo di velocità simulato non combacia con quello ideale che la vettura dovrebbe seguire.

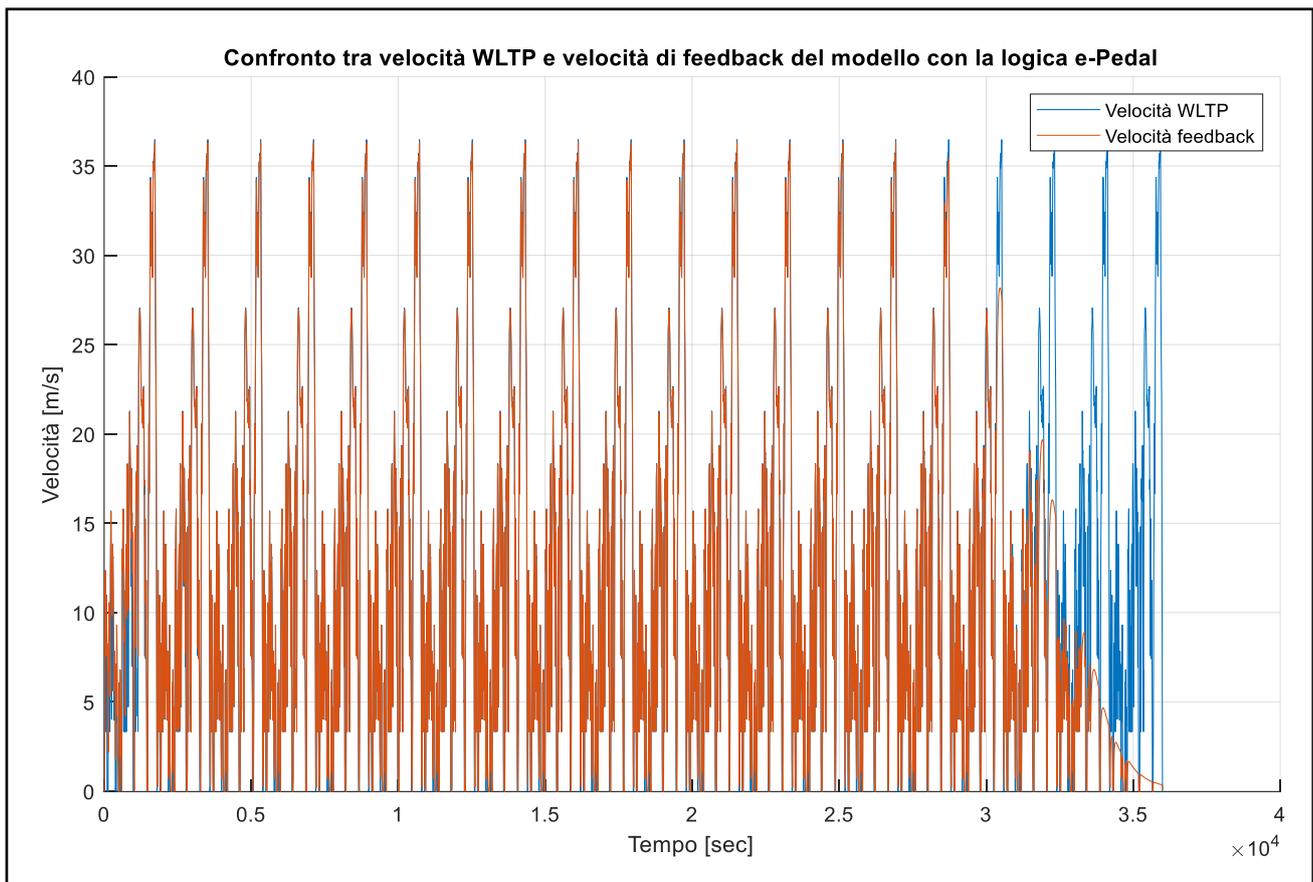


Figura 88 – Andamento dei profili di velocità della normativa e del modello Simulink

Anche in questo caso, come in quello riportato nella prova 2, nel primo ciclo si ha un livello di state of charge iniziale massimo, pari al 100%, che annulla completamente il fenomeno della frenata rigenerativa, impedendo al veicolo di seguire correttamente il profilo di velocità del ciclo WLTP, come riportato in Figura 89 e in Figura 90, dato che per bassi valori della velocità, la frenata rigenerativa non può entrare in funzione.

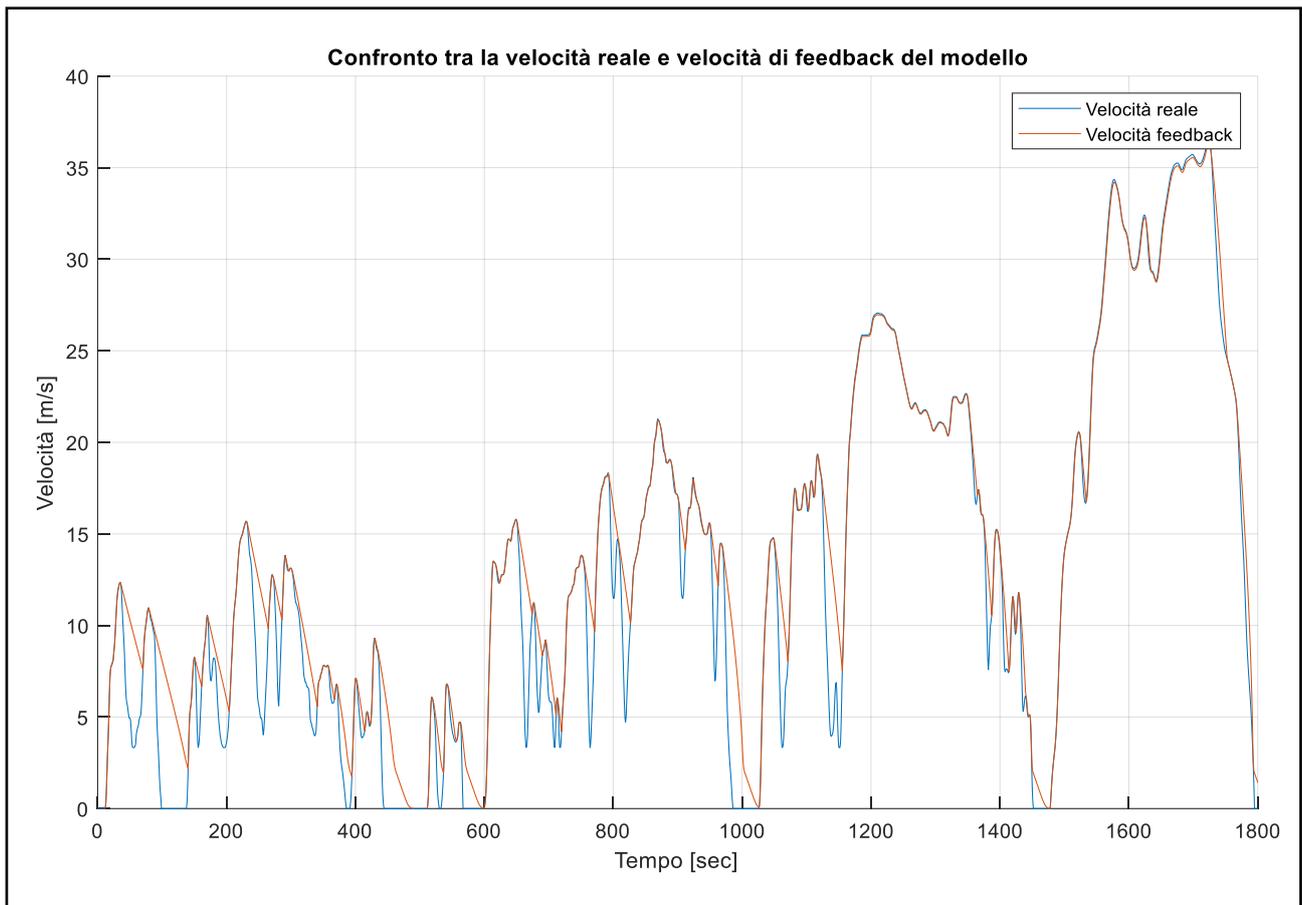


Figura 89 – Andamento dello state of charge per il primo ciclo WLTP

Per quanto riguarda gli ultimi quattro cicli del percorso invece, dal particolare in Figura 90 si nota come l'andamento del profilo di velocità del modello simulato decresca nel tempo, a causa dello state of charge che è sempre più basso, e che non consente al veicolo di raggiungere le velocità dettate dal ciclo WLTP di riferimento.

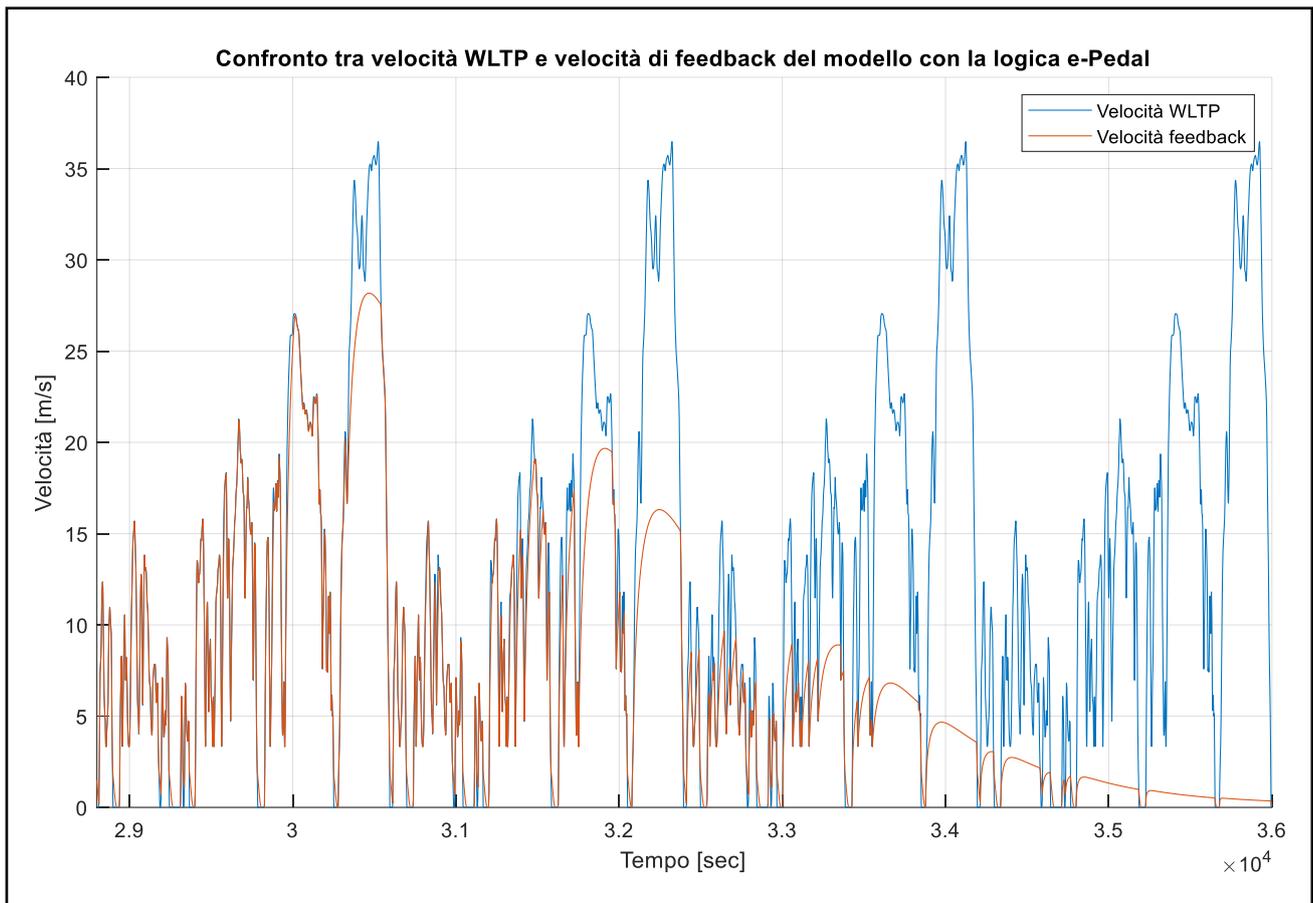


Figura 90 – Andamento del profilo di velocità sugli ultimi cicli WLTP

7.4.2 – Richiesta di accelerazione e frenata

Per quanto riguarda le richieste di coppia motrice e di coppia frenante mostrate in Figura 91, l'andamento generale della curva dell'accelerazione in questa nuova configurazione è molto simile a quello visto nella prova 2, dato che possiede lo stesso andamento e gli stessi valori di picco, ma con la differenza che con l'introduzione della logica dell'e-Pedal il sistema riesce ad arrivare alla condizione di regime con un ciclo in meno, ovvero con soli tre cicli.

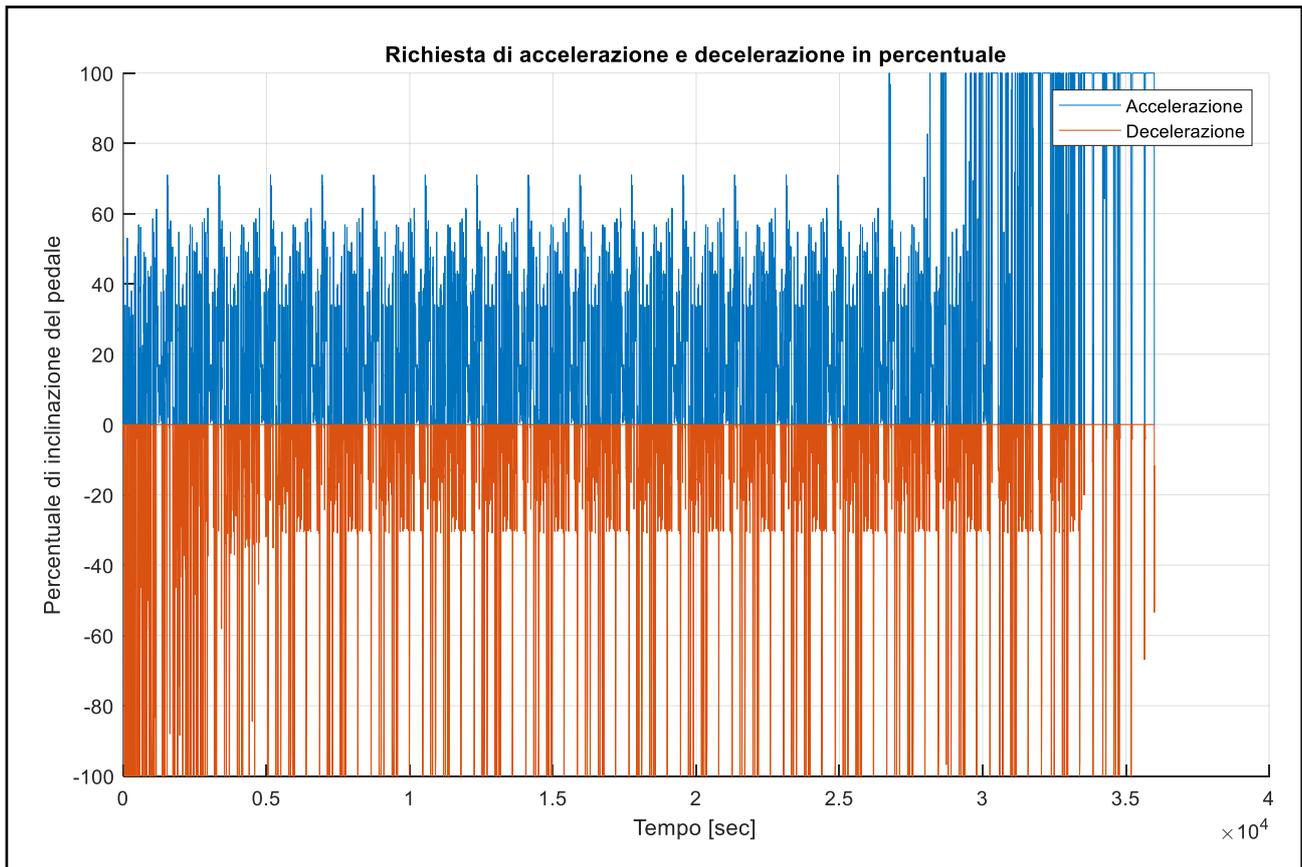


Figura 91 – Richiesta di accelerazione e di decelerazione per il percorso completo

Anche in questo caso, come per la prova 2, dato che nei primi cicli WLTP il livello di state of charge è massimo, e la frenata rigenerativa presenta un'intensità ridotta al minimo, si deduce come essa non riuscirà a fornire tutta la decelerazione richiesta dal conducente, per cui la posizione dell'e-Pedal dovrà compensare tale mancanza, incrementando quindi la richiesta di decelerazione. Si ricorda che questa simulazione, come per la seconda, non possiede il sistema frenante dissipativo, per cui l'unico modo per ottenere la decelerazione richiesta è quello di massimizzare la frenata rigenerativa.

7.4.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice

Anche l'andamento delle curve relative alla coppia frenante e alla massima coppia recuperabile in fase di decelerazione, riportate in Figura 92, è simile a quello analizzato per la prova 2, con gli stessi valori di picco ed anche con gli stessi valori medi. Anche qui, come per la richiesta di coppia motrice o frenante, si raggiunge la condizione di regime con un ciclo in anticipo rispetto alla seconda simulazione, solo per l'implementazione della logica dell'e-Pedal. Tale risultato era prevedibile, dato gli unici cambiamenti che sussistono tra la seconda e la quarta prova riguardano l'implementazione delle due nuove condizioni per la gestione del sistema e-Pedal.

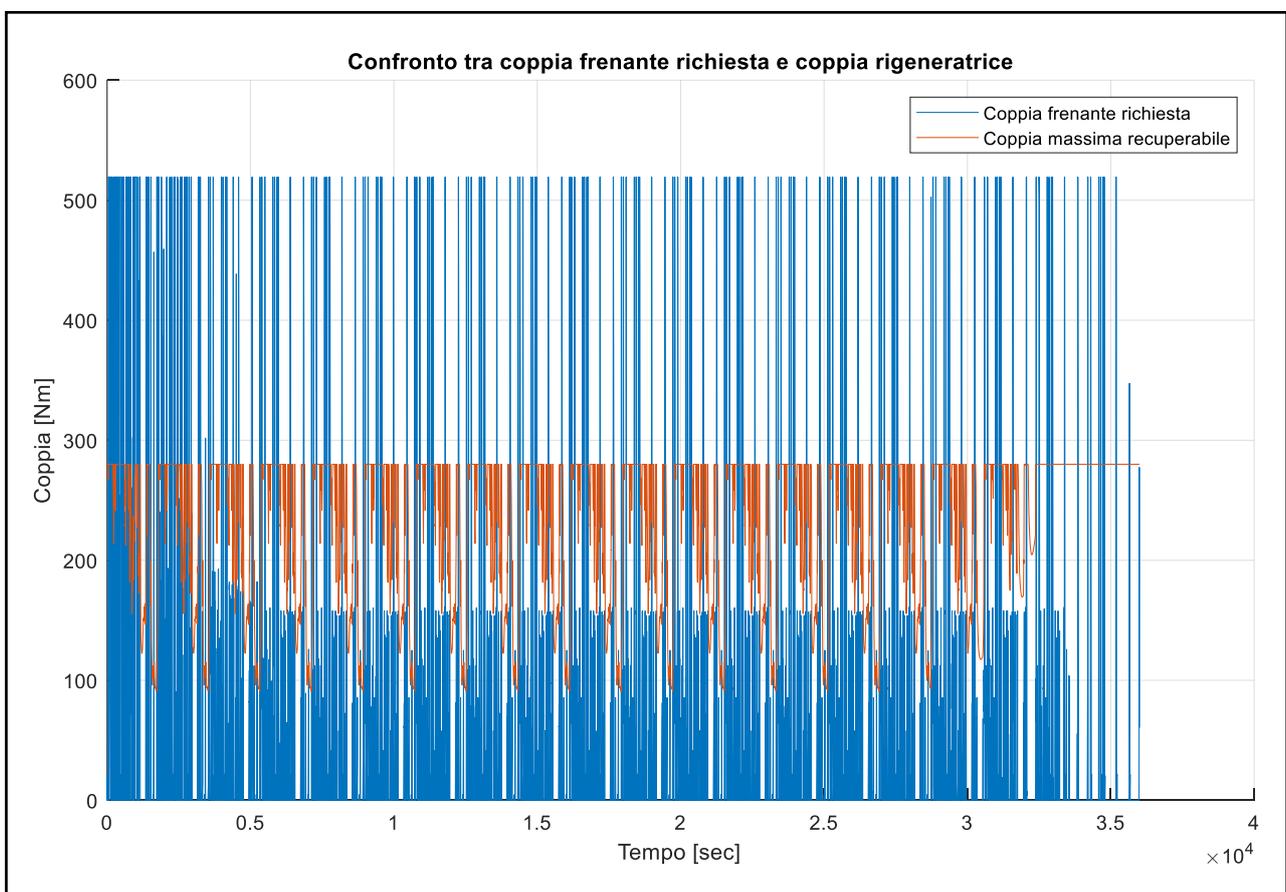


Figura 92 – Confronto tra coppia frenante richieste e coppia massima rigeneratrice

7.4.4 – Coefficiente globale di rigenerazione

Il coefficiente globale di rigenerazione mostrato in Figura 93, non presenta un andamento come quelli visti in precedenza, dato che in questo caso per le prime fasi del percorso, ed in particolare per i primi quattro cicli WLTP, il coefficiente di rigenerazione legato all'intensità della decelerazione possiede una maggiore densità di picchi con valori unitari, che consentono di raggiungere il valore unitario del coefficiente globale di rigenerazione con tempi minori. Inoltre, questo coefficiente legato all'intensità della decelerazione viene anche moltiplicato per un guadagno pari a tre, che incrementa notevolmente il valore del coefficiente globale di rigenerazione (che viene successivamente sottoposto a saturazione).

Infatti, questa quarta simulazione è la prima del suo genere, in cui vi è sia la logica dell'e-Pedal attiva, sia l'assenza della frenata dissipativa: gli effetti combinati di questi due fattori, portano alla determinazione della curva del coefficiente globale di rigenerazione, che presenta dei picchi di valore unitario già nelle prime fasi del percorso, a differenza di quanto accadeva per le altre prove, dove il valore unitario veniva raggiunto almeno dal terzo ciclo in poi.

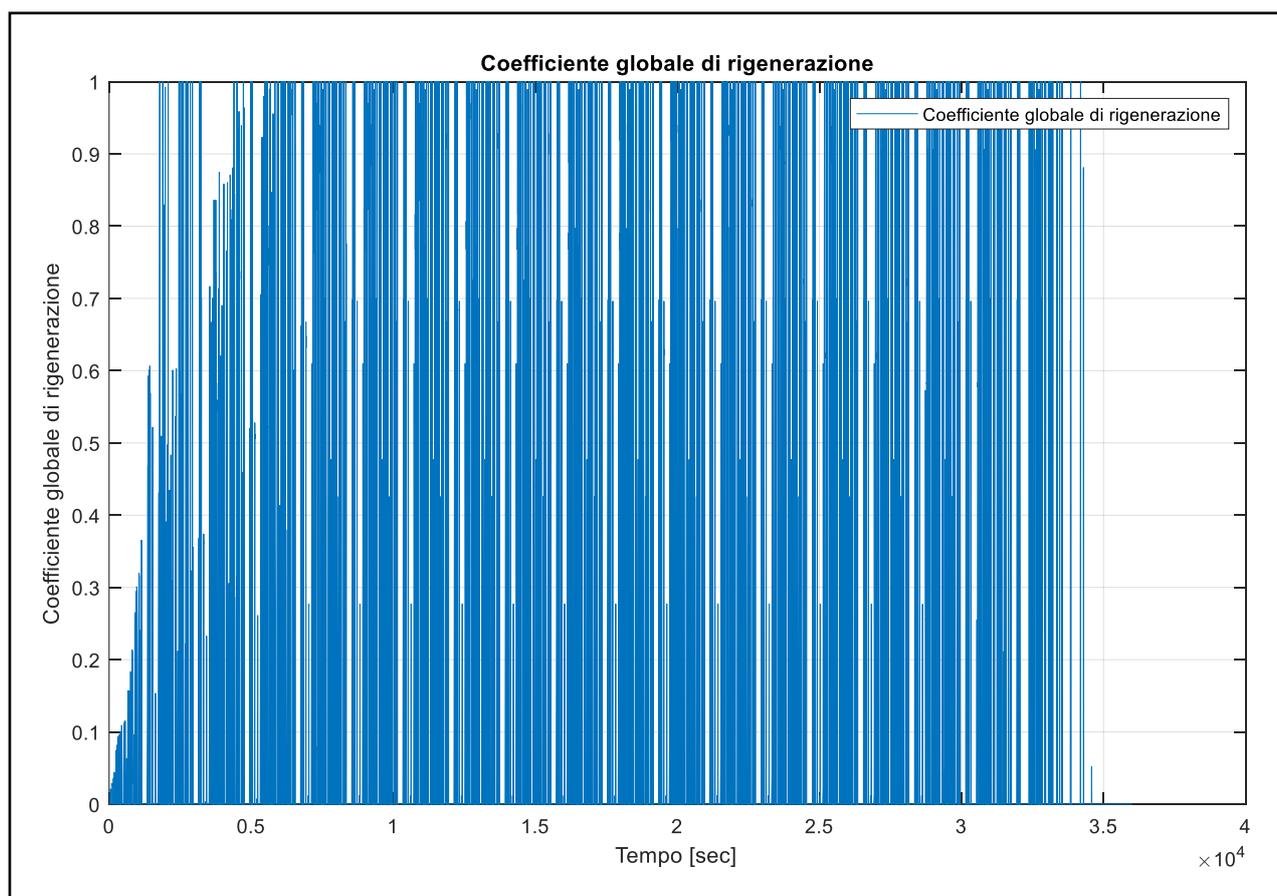


Figura 93 – Coefficiente globale di rigenerazione

7.4.5 – Coppia frenante rigeneratrice

Una volta determinate le curve che descrivono il comportamento della massima coppia rigenerabile e del coefficiente globale di rigenerazione, si può valutare la reale coppia rigeneratrice che verrà utilizzata per ripristinare lo state of charge della batteria, attraverso la moltiplicazione puntuale dei valori che riportano le suddette curve, generando quindi i risultati presenti in Figura 94. Essa mostra come la coppia effettivamente recuperata in fase di decelerazione segua l'andamento del coefficiente globale di rigenerazione nelle fasi iniziali del percorso, per poi assumere un andamento come quello riportato dalla coppia frenante richiesta, ma di modulo minore, dato che è ancora presente il coefficiente di limitazione della coppia rigenerativa pari a 0,8.

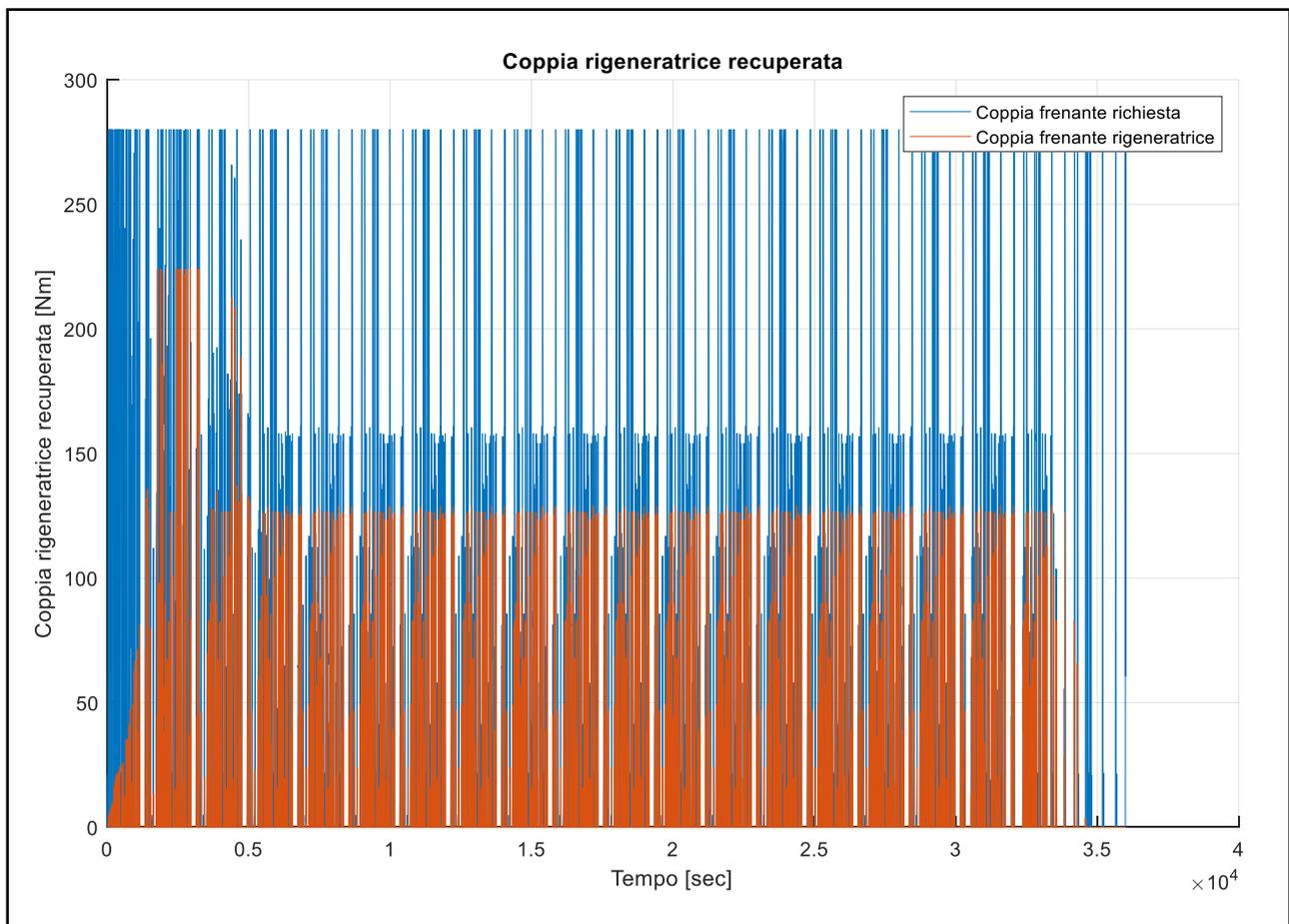


Figura 94 – Coppia frenante rigenerativa

7.4.6 – Coppia frenante dissipativa

In Figura 95 viene invece mostrato l'andamento della coppia dissipativa, data dalla differenza tra la coppia totale richiesta dal conducente e dalla coppia rigenerativa che la frenata rigenerativa è capace di esercitare. Si sottolinea che l'andamento della coppia dissipativa presenta dei picchi in corrispondenza degli intervalli in cui la frenata rigenerativa non è attiva, ovvero per velocità del veicolo inferiori ai 2 m/s, e di come questi intervalli presentino un valore in modulo esattamente pari alla coppia frenante richiesta.

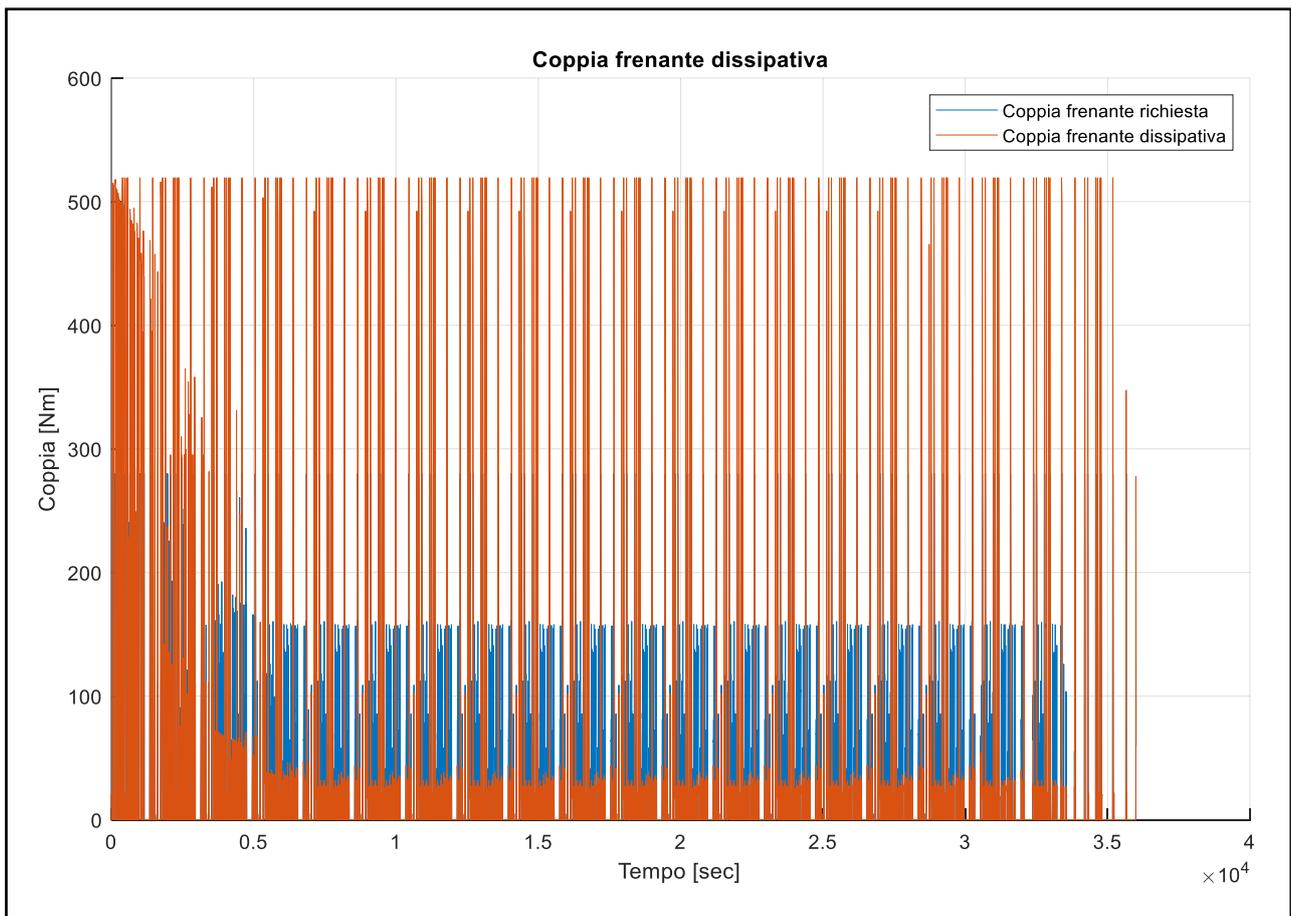


Figura 95 – Coppia frenante dissipativa

7.4.7 – State of charge

I risultati di questa quarta simulazione vengono infine descritti con il grafico dello state of charge riportato in Figura 96, in cui si evince un netto miglioramento rispetto alla prova 2, con il raggiungimento del livello di carica residua pari al 2% dopo 32297 secondi, rispetto ai 32289 secondi riportati nella seconda prova. Nello specifico, partendo da una state of charge pari al 100%, è stato possibile percorrere 417,17 km, a fronte dei 417,07 km della prova 2.

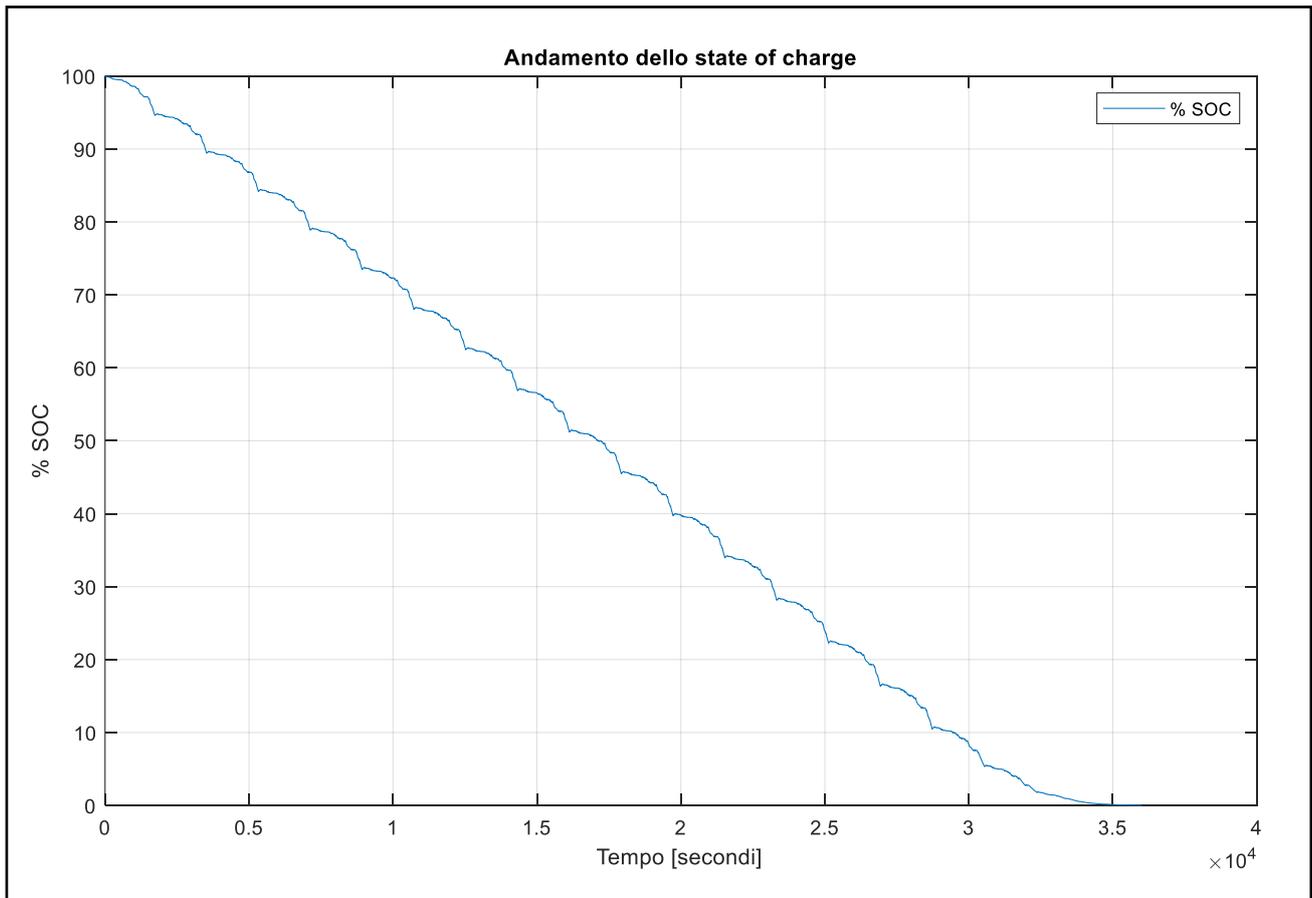


Figura 96 – Andamento dello state of charge

7.4.8 – Conclusioni relative alla prova 4

Questa quarta simulazione ha permesso di comprendere come l'implementazione della logica del sistema e-Pedal porti ad un miglioramento dello state of charge, seppur trascurabile, ma non rispecchia il profilo di velocità definito dal ciclo WLTP, a causa delle richieste di coppia frenante che non vengono soddisfatte quando la velocità della vettura scende al di sotto dei 2 m/s, oppure quando la decelerazione è troppo intensa e la sola frenata rigenerativa non riesce a fornire la coppia frenante necessaria. Per questo motivo, tale simulazione non può essere considerata come una prova di un veicolo reale, dato che per questi intervalli di tempo il profilo di velocità assumerà un andamento lineare, dettato dalla massima decelerazione che potrà essere fornita dalla frenata rigenerativa, e che andrà inevitabilmente a sottostimare la coppia motrice che richiederà il conducente in fase di accelerazione, dato che il veicolo possiederà ancora una piccola quantità di energia cinetica, che non dovrà quindi essere fornita dal motore elettrico. Un esempio viene riportato in Figura 97, in cui si mostra quanto appena descritto, specie nei primi tratti, dove l'andamento della velocità simulata è lineare.

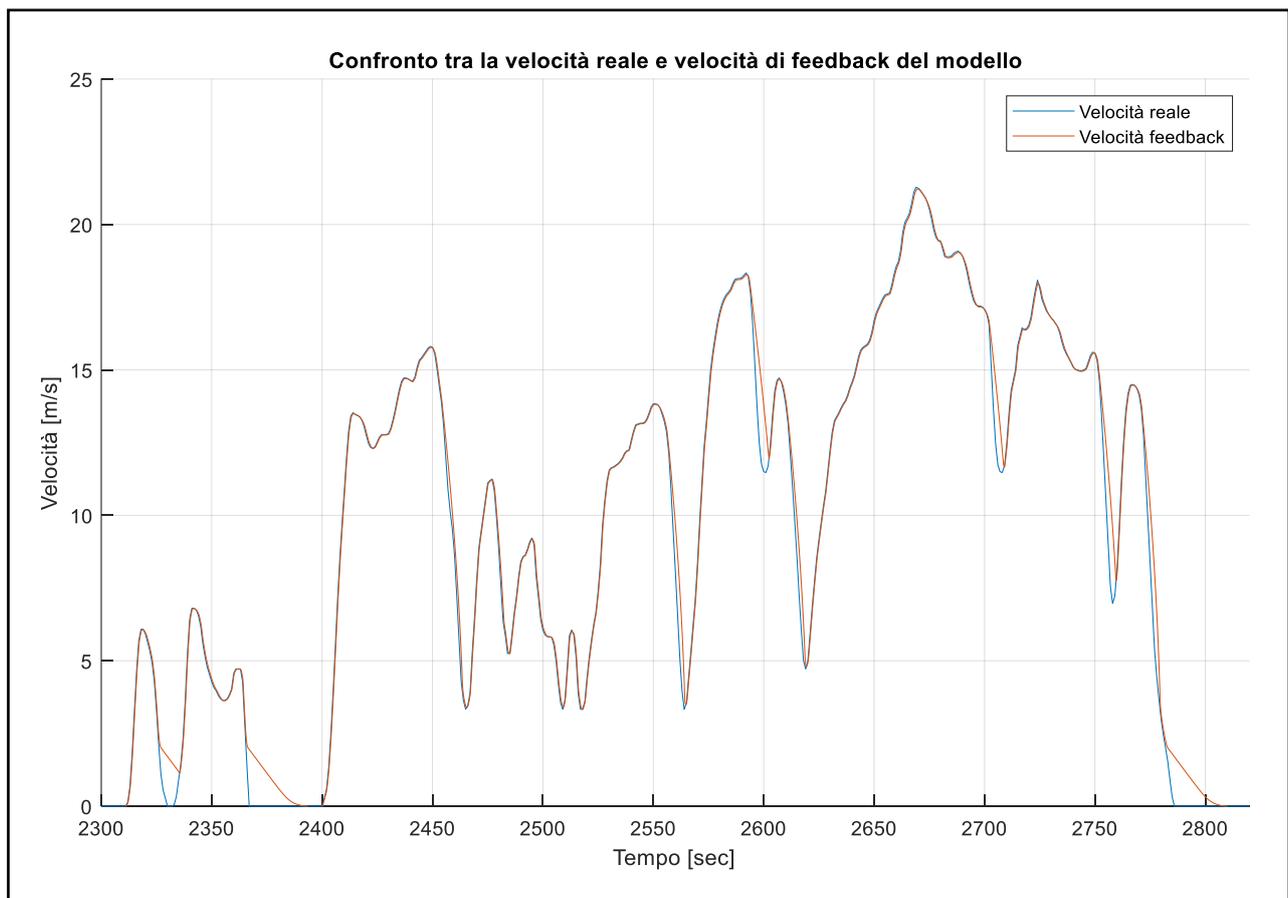


Figura 97 – Errori dovuti alla rapida decelerazione

7.5 – Prova 5

La quinta prova prevede una modifica ai parametri del modello Simulink secondo quanto segue:

- La logica del sistema e-Pedal è abilitata;
- I freni tradizionali, ovvero quelli dissipativi sono abilitati;
- Il coefficiente di riduzione della frenata rigenerativa è pari a 1.

In questa nuova simulazione, vengono presi in considerazione i coefficienti derivanti dalle lookup table relative alla velocità di crociera del veicolo e all'intensità della decelerazione, dato che sono parte integrante della logica del sistema e-Pedal. Vengono attivati i freni dissipativi tradizionali, in modo da poter fornire una coppia frenante aggiuntiva a quella rigenerativa, nel caso in cui quest'ultima non dovesse essere sufficiente, ed il coefficiente che moltiplica la massima coppia recuperabile è unitario.

Si effettua quindi un confronto con la prova 1, per verificare le differenze tra un veicolo sul quale è implementata la logica dell'e-Pedal, ed un veicolo elettrico tradizionale, entrambi con la frenata tradizionale dissipativa attiva, pronta ad essere utilizzata in caso di necessità, e con il coefficiente moltiplicativo della coppia rigeneratrice che passa da 0,8 nella prima prova, a 1 in questa prova.

7.5.1 – Analisi del profilo di velocità

Il primo grafico in Figura 98 che viene analizzato per la quinta simulazione, riporta il confronto tra i profili di velocità del ciclo WLTP e del modello della vettura in ambiente Simulink: la curva blu indica il ciclo WLTP da seguire come da normativa, mentre la curva rossa indica il profilo di velocità che viene seguito dal veicolo durante la simulazione. Da questo primo confronto, si nota che l'andamento del profilo di velocità simulata, inizia a differire dal ciclo di riferimento dopo un numero di cicli inferiore a quelli registrati per la prova 1. Questo vuol dire che per la prova 1, la vettura riusciva a seguire correttamente il profilo di velocità imposto dal ciclo WLTP per un tempo maggiore rispetto a questa quinta simulazione. Infatti, in questo caso, la curva della velocità non raggiunge il picco di velocità presente nel ciclo WLTP già a partire dal quindicesimo ciclo, mentre nel primo caso questo fenomeno era evidente a partire dal sedicesimo ciclo, e appena percettibile nel quindicesimo, come mostrato in Figura 99, dove viene mostrato l'inizio del distacco dal ciclo di riferimento.

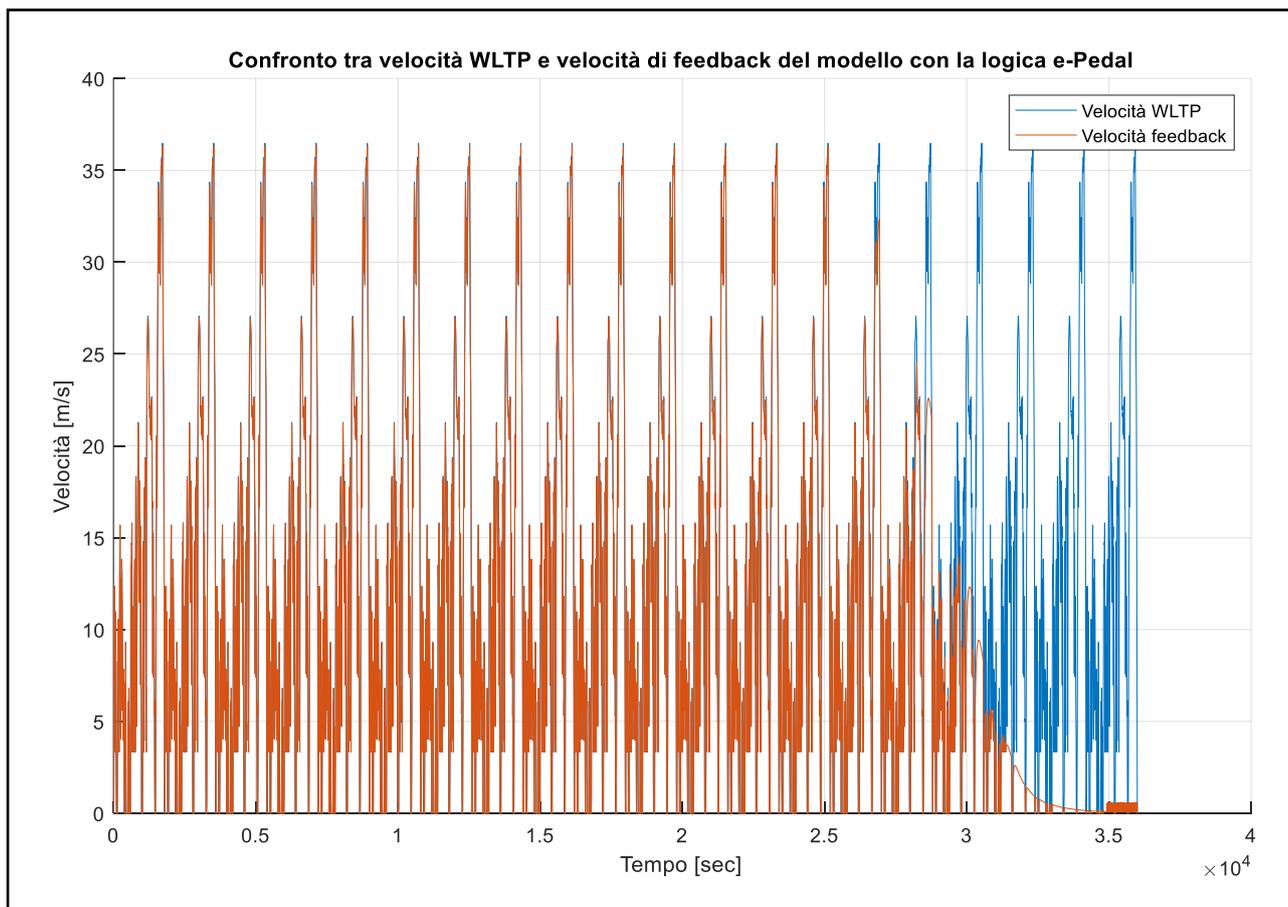


Figura 98 - Andamento dei profili di velocità della normativa e del modello Simulink

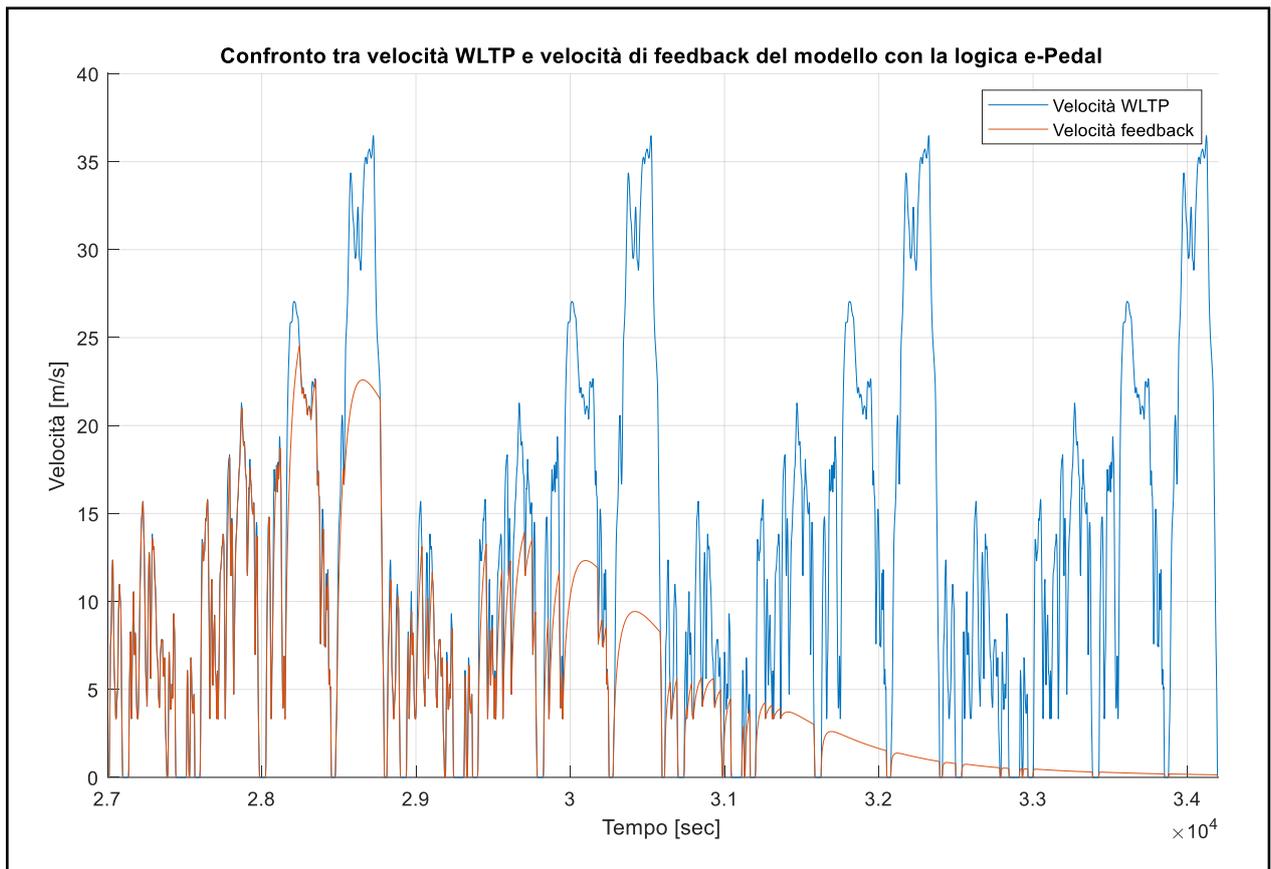


Figura 99 - Andamento del profilo di velocità sugli ultimi cicli WLTP

7.5.2 – Richiesta di accelerazione e frenata

La richiesta di accelerazione mostrata in Figura 100, presenta lo stesso andamento e gli stessi valori di picco mostrati anche in Figura 46 per la prova 1, mentre per la parte relativa alla decelerazione, si registra un valore medio inferiore rispetto a quello rilevato dalla prova 1, rispettivamente pari a circa il 25% e al 37% della richiesta massima di decelerazione. Questo perché nella nuova configurazione il coefficiente che moltiplica la coppia rigeneratrice viene incrementato, portandolo da 0,8 a 1, con conseguente aumento della decelerazione e diminuzione della richiesta di coppia nell'istante successivo.

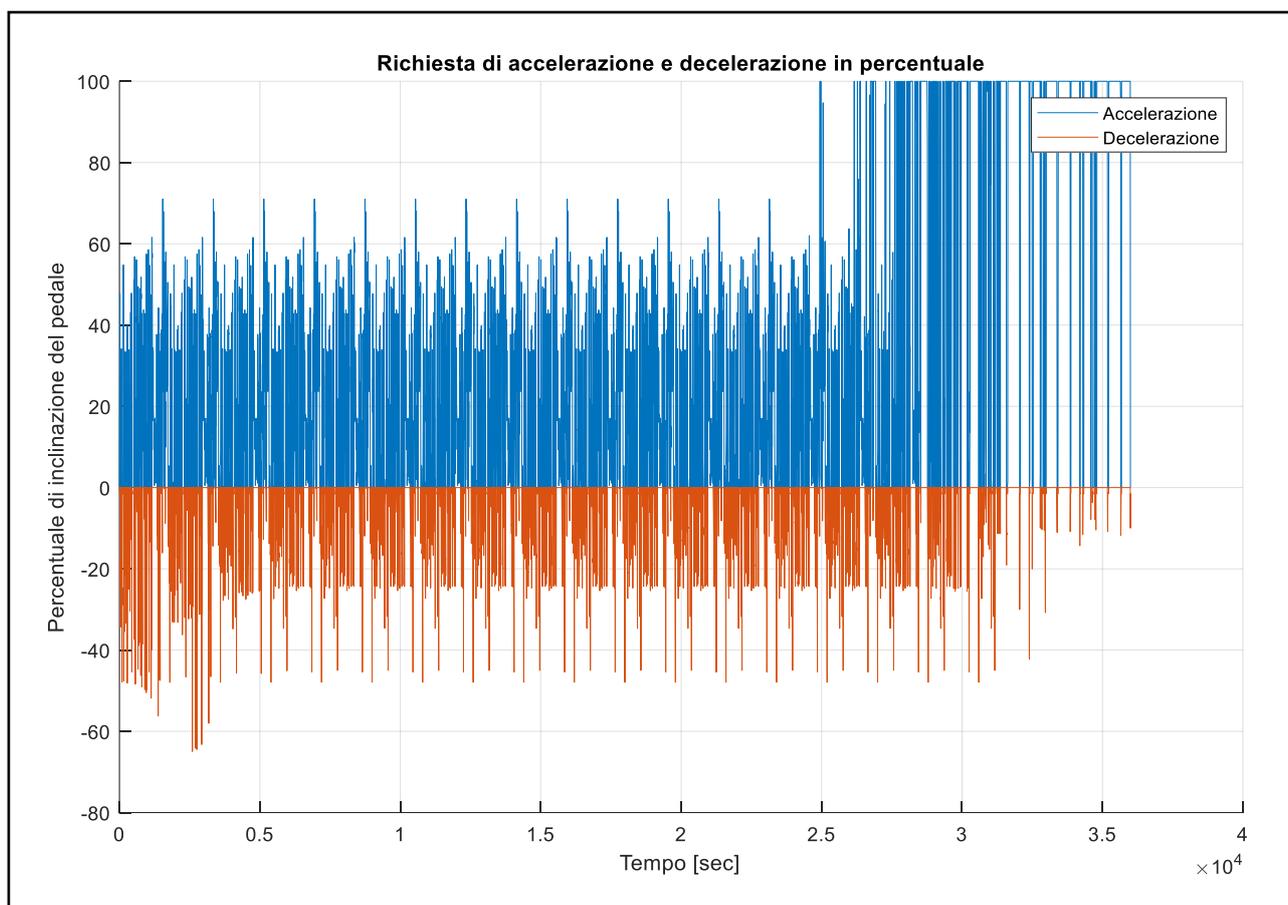


Figura 100 - Richiesta di accelerazione e di decelerazione per il percorso completo

7.5.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice

L'andamento mostrato in Figura 101 rispecchia quello visto in Figura 50, relativo alla prova 1, con gli stessi valori medi e gli stessi valori di picco. Infatti le uniche differenze tra la prima simulazione e questa, riguardano l'aumento del coefficiente moltiplicativo della coppia rigeneratrice (da 0,8 a 1), e l'implementazione della logica del sistema e-Pedal, che introduce ulteriori controlli e riduce (seppur di poco) il coefficiente globale di rigenerazione, come mostrato nel seguito, per cui non risultano sostanziali differenze tra le due prove.

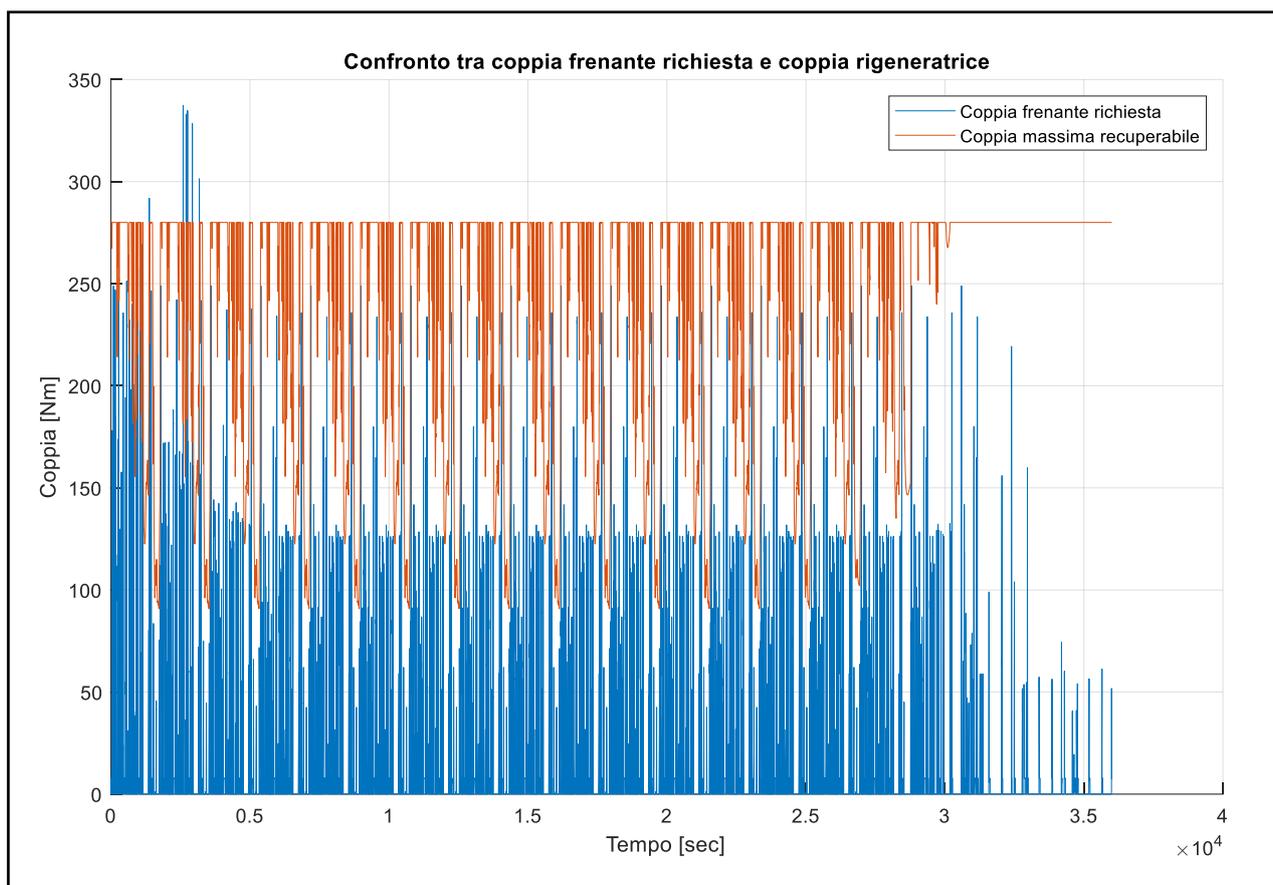


Figura 101 - Confronto tra coppia frenante richieste e coppia massima rigeneratrice

In particolare, si nota come la coppia frenante richiesta presenta dei valori in modulo che sono inferiori a quelli presentati nella prova 1, a conferma dell'aumento del coefficiente moltiplicativo della coppia rigeneratrice, che passa da 0,8 a 1.

7.5.4 – Coefficiente globale di rigenerazione

L'andamento del coefficiente globale della rigenerazione riportato in Figura 102, presenta un andamento simile a quello riportato nella prova 4, dato che in entrambi è implementata la logica dell'e-Pedal, e in aggiunta, in questa prova il coefficiente moltiplicativo della coppia rigeneratrice è stato incrementato. Pertanto si registra il raggiungimento della condizione di regime per un numero di cicli inferiore rispetto a quanto visto per i primi due casi, in cui la logica del sistema e-Pedal non era ancora stata implementata. Infatti il coefficiente globale della rigenerazione per questa prova, presenta un andamento molto simile a quello esposto anche nella Prova 3 e nella Prova 4, in cui è implementata tale logica.

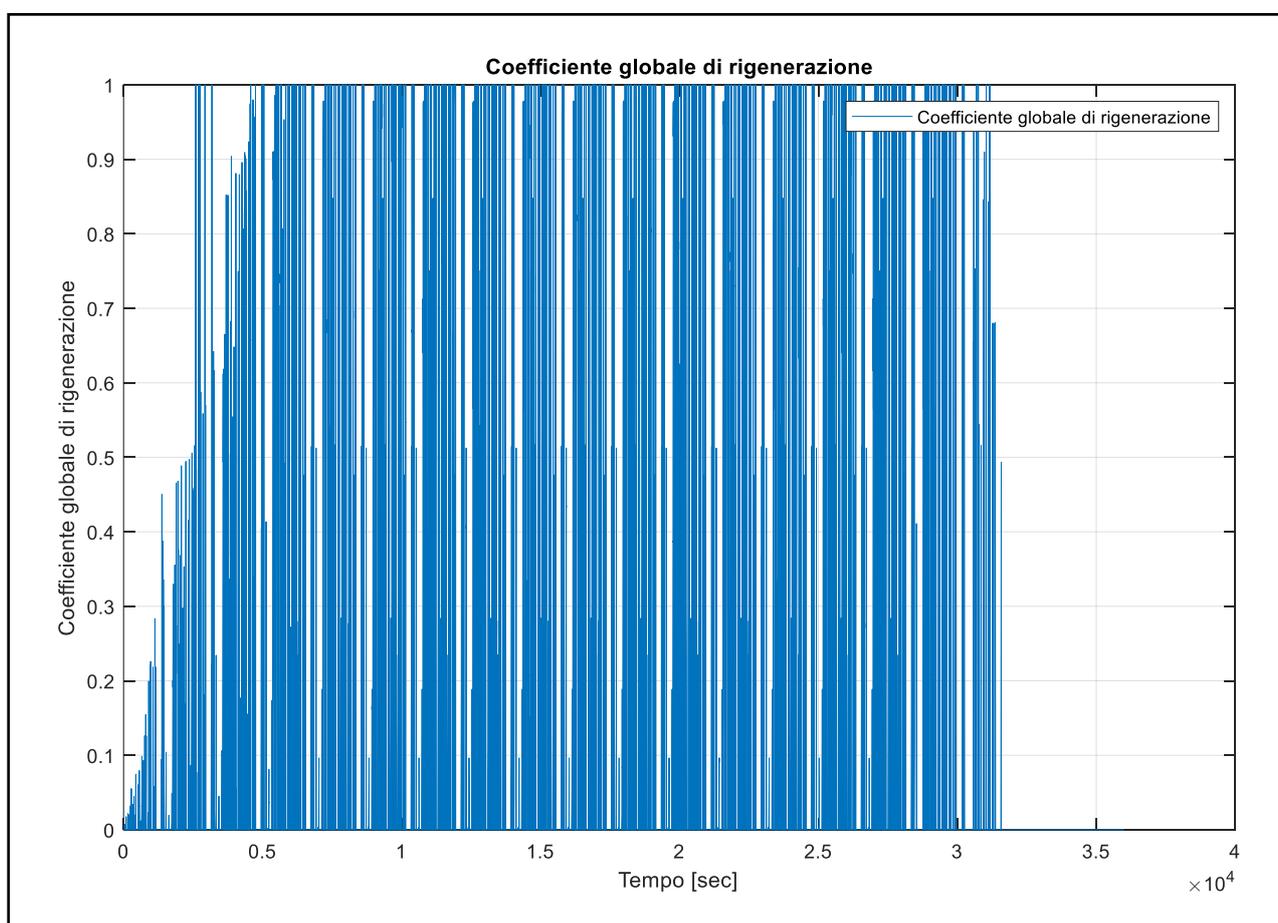


Figura 102 - Coefficiente globale di rigenerazione

7.5.5 – Coppia frenante rigeneratrice

La coppia frenante rigenerativa invece, presenta un andamento crescente nei primi cicli del percorso, in funzione del coefficiente rigenerativo legato allo state of charge del veicolo, e una volta arrivato a regime, dopo i primi tre cicli WLTP, la totalità della coppia frenante rigenerabile viene effettivamente impiegata per ripristinare lo state of charge del veicolo, limitando al minimo l'utilizzo del freno dissipativo tradizionale. Questo effetto è la conseguenza dell'incremento del coefficiente moltiplicativo applicato alla massima coppia rigenerativa, che è stato incrementato da 0,8 a 1, come detto nelle ipotesi iniziali, e lo si vede chiaramente in Figura 103, in quanto, a partire dal quarto ciclo, le curve della frenata massima frenata rigenerativa e della frenata richiesta dal conducente coincidono, ad eccezione degli intervalli di tempo nei quali la velocità della vettura risulta inferiore al limite minimo per l'attivazione della frenata rigenerativa, pari a 2 m/s, dove subentra la frenata classica dissipativa.

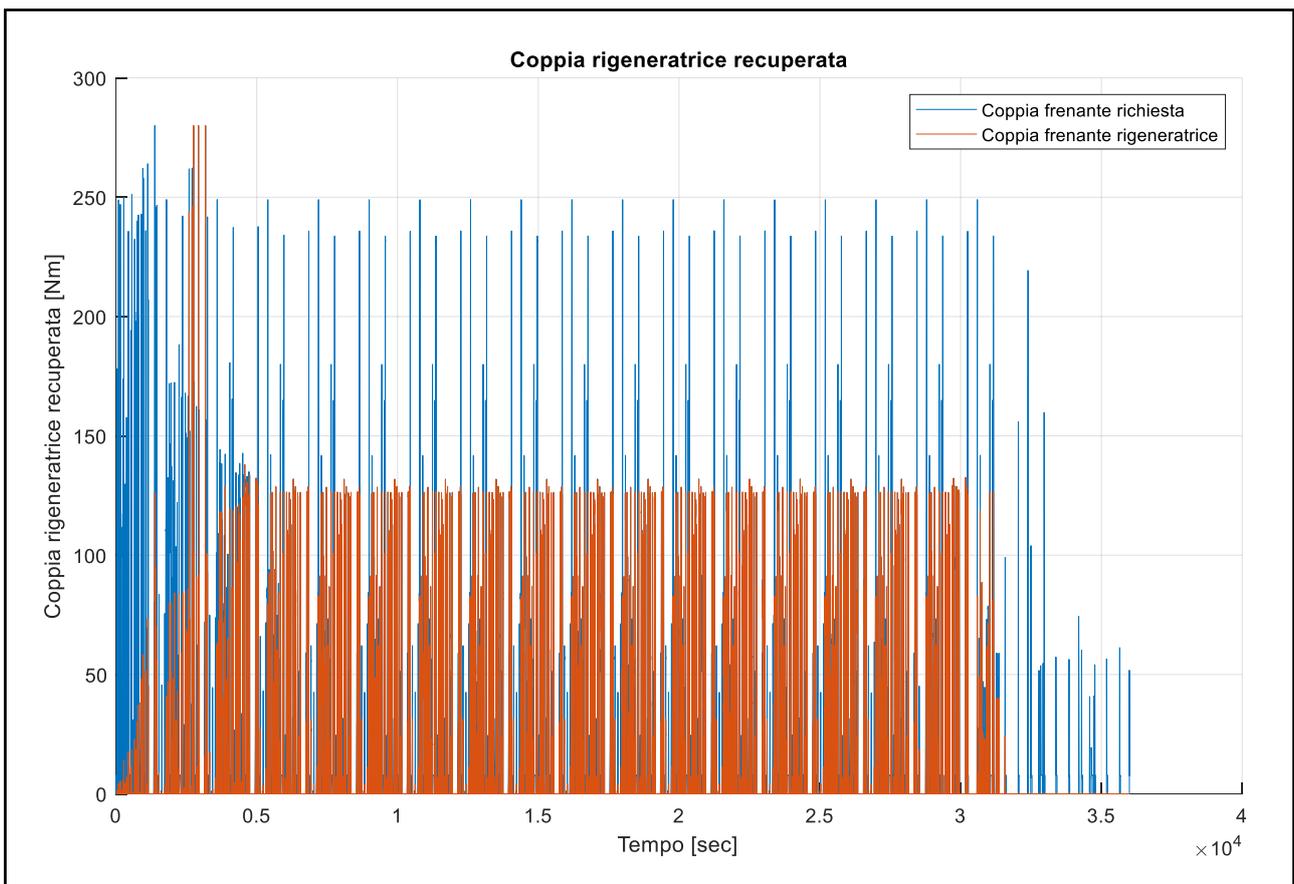


Figura 103 - Coppia frenante rigenerativa

7.5.6 – Coppia frenante dissipativa

Come appena preannunciato, in questo caso la coppia dissipativa deve essere attivata solo per quei brevi intervalli temporali in cui la frenata rigenerativa non riesce a soddisfare tutta la decelerazione richiesta dal conducente, come mostrato in Figura 104. Questo avviene perché la frenata rigenerativa non è attiva, oppure a causa del coefficiente globale di rigenerazione che limita la coppia effettivamente rigenerabile in fase di decelerazione, come per i primi cicli del percorso. Questi intervalli di tempo in cui deve intervenire il freno dissipativo, sono limitati a quegli intervalli temporali in cui la velocità è inferiore al limite minimo di soglia per l'attivazione della frenata rigenerativa, come mostrato in Figura 105, per il decimo ciclo percorso.

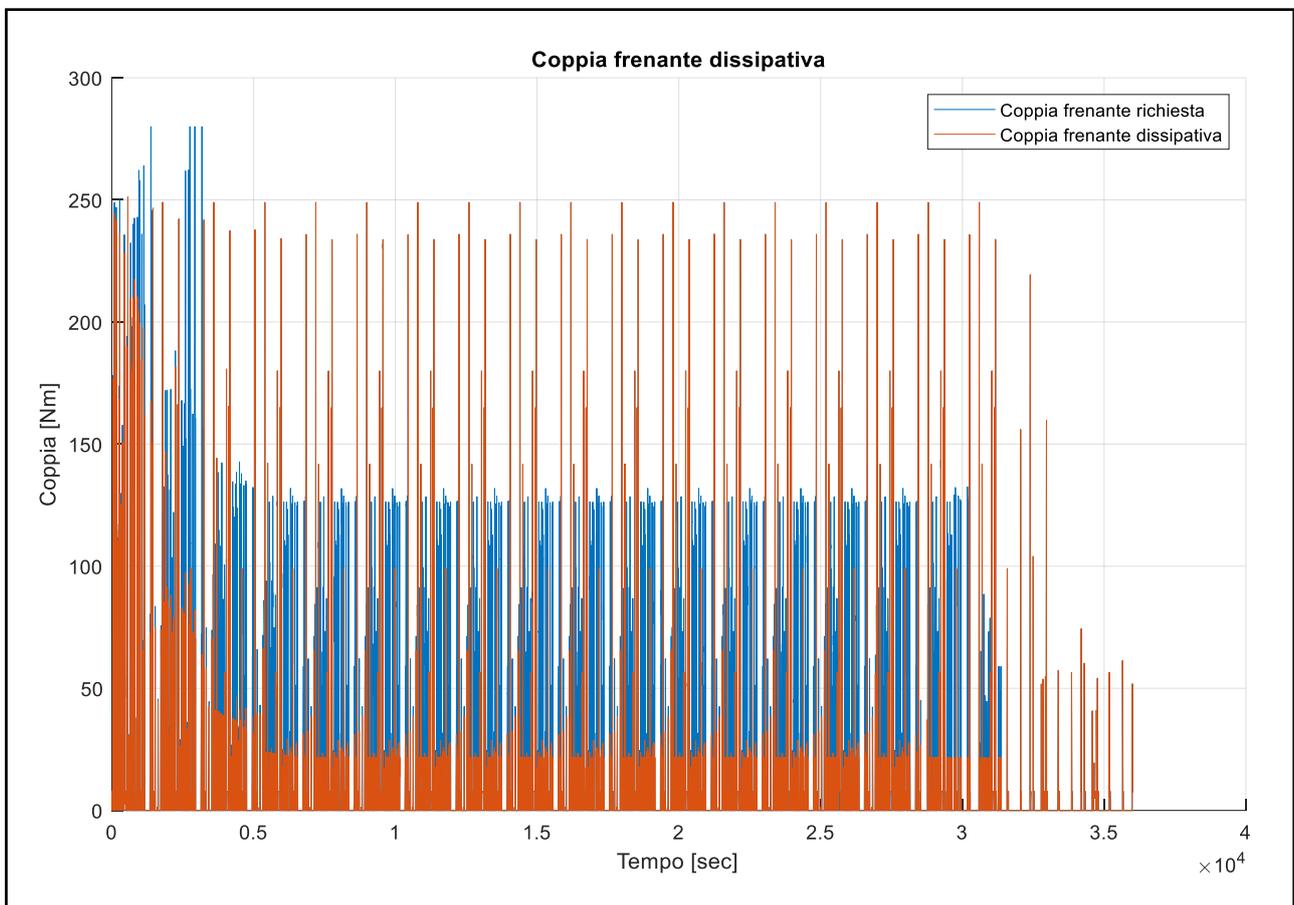


Figura 104 - Coppia frenante dissipativa

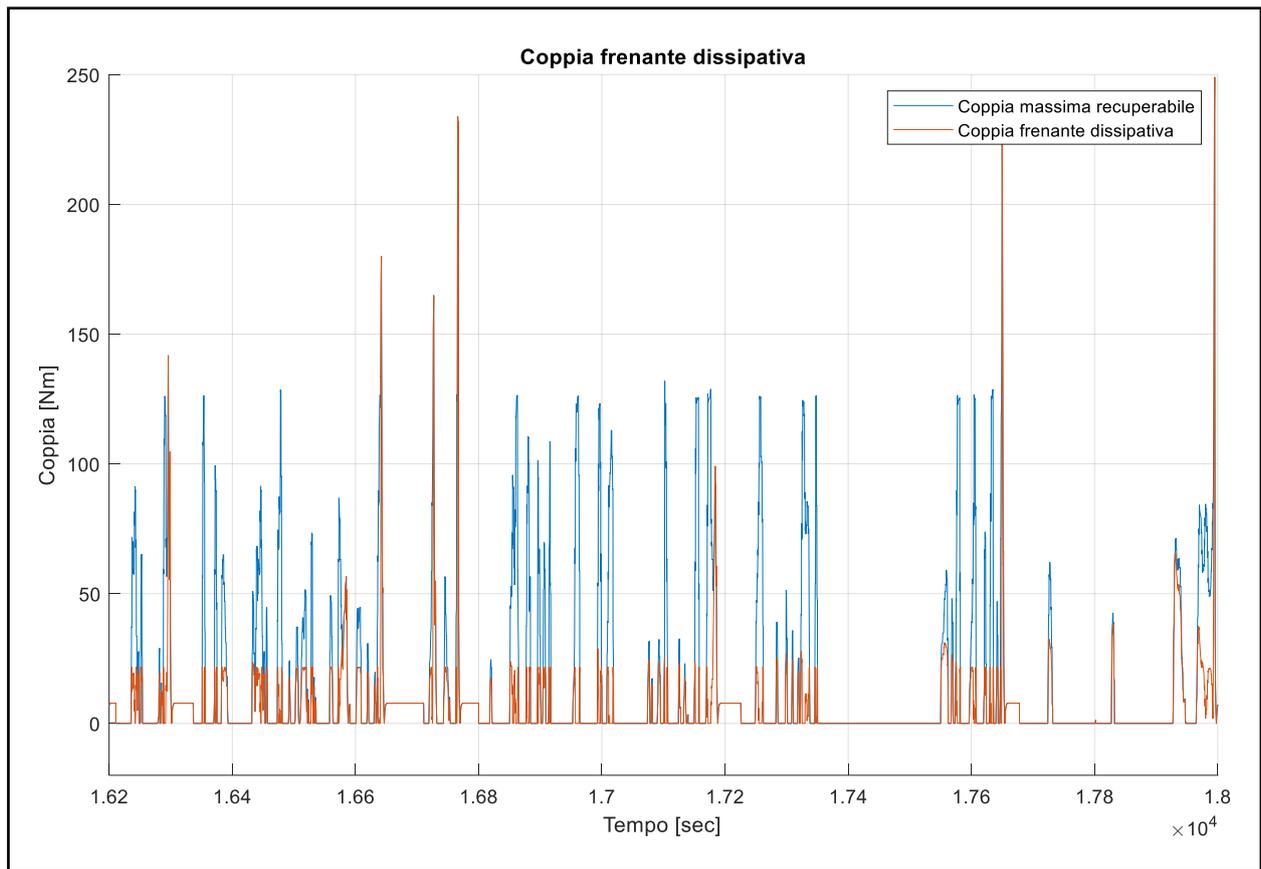


Figura 105 – Coppia frenante dissipativa per il decimo ciclo

7.5.7 – State of charge

Lo state of charge della quinta prova presentato in Figura 106 risulta leggermente inferiore rispetto al caso della prova 1, a causa dalle ulteriori condizioni che sono state aggiunte per determinare il coefficiente globale di rigenerazione, con l'introduzione dei due nuovi coefficienti rigenerativi compresi tra zero ed uno. Nello specifico, la prova 5 parte con una carica iniziale della batteria pari al 100%, e raggiunge un valore dello state of charge pari al 2% dopo soli 29.743 secondi (circa dopo 8,26 ore), rispetto ai 30.383 secondi della prova 1 (pari a circa 8,44 ore), con una diminuzione di circa 8,27 km. Infatti, per questa prova viene raggiunto il 2% di state of charge dopo aver percorso 384,17 km.

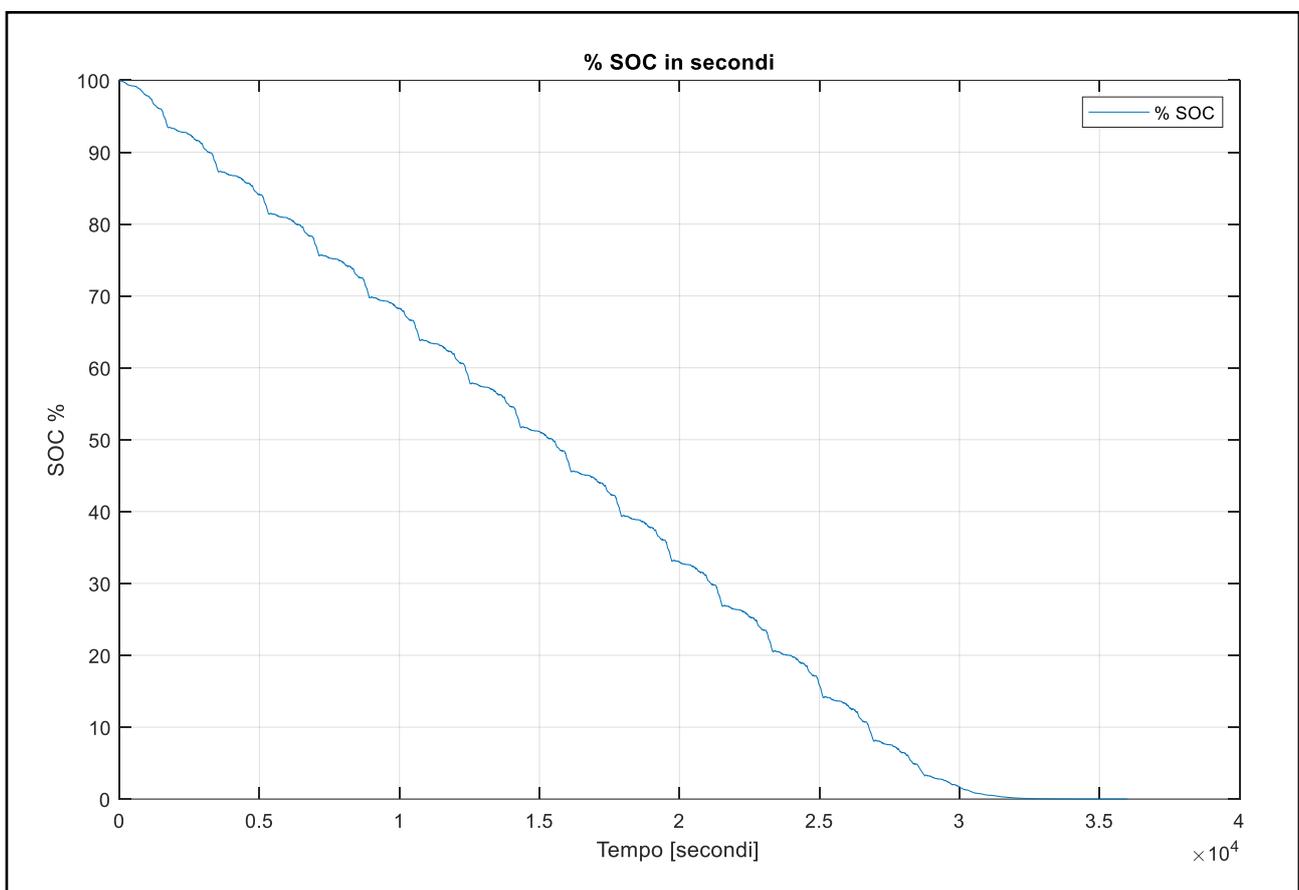


Figura 106 - Andamento dello state of charge

7.5.8 – Conclusioni relative alla prova 5

Dal confronto tra la prova 1 e la prova 5, è stato appurato che lo state of charge diminuisce di pochi punti percentuali, dato che su 384,18 km percorsi (pari al raggiungimento del 2% della carica residua) si ha un decremento di solo 8,27 km, pari quindi ad una diminuzione del 2,15%.

È stato confermato inoltre che l'implementazione della logica dell'e-Pedal, diminuisce di fatto la capacità di rigenerazione dello state of charge del veicolo, a causa delle nuove condizioni che vengono applicate e che generano due ulteriori coefficienti di rigenerazione, compresi tra zero ed uno, ma di come questa variazione venga compensata dall'incremento del coefficiente moltiplicativo della coppia rigeneratrice, che passa da 0,8 ad un valore unitario.

Questa prova, a discapito delle altre viste in precedenza, quali la prova 4 o la prova 2, può ritenersi a tutti gli effetti una prova realistica per la valutazione dell'autonomia del veicolo, dato che tutti i componenti sono attivi, come nella prova 1, e le uniche modifiche apportate hanno riguardato la logica di gestione della frenata rigenerativa.

Si sottolinea che probabilmente, il fattore moltiplicativo della coppia rigeneratrice, che era stato fissato inizialmente pari a 0,8 per un modello di veicolo elettrico tradizionale, non rispecchia il valore che dovrebbe assumere nella realtà, in quanto sovradimensionato. Seguendo questo ragionamento, sarebbe opportuno effettuare delle ulteriori indagini relative a tale coefficiente, per determinarlo con precisione, in modo da ottenere delle simulazioni dell'autonomia dei veicoli elettrici, che rispecchino quelle dei modelli reali, per poter successivamente ritestare la logica dell'e-Pedal e confrontare i nuovi valori dell'autonomia.

7.6 – Prova 6

La sesta prova prevede una modifica ai parametri del modello Simulink secondo quanto segue:

- La logica del sistema e-Pedal è abilitata;
- I freni tradizionali, ovvero quelli dissipativi sono disabilitati;
- Il coefficiente di riduzione della frenata rigenerativa è unitario.

In quest'ultima simulazione, vengono presi in considerazione i coefficienti derivanti dalle lookup table relative alla velocità di crociera del veicolo e all'intensità della decelerazione, dato che sono parte integrante della logica del sistema e-Pedal. Vengono disattivati i freni dissipativi tradizionali, quindi l'unico modo per ottenere una decelerazione è utilizzare la coppia frenante rigeneratrice, ed il coefficiente che moltiplica la massima coppia rigeneratrice è unitario.

Si effettua quindi un confronto con la prova 2, la quale non presenta la logica dell'e-Pedal, il freno dissipativo tradizionale è disattivato come per questo caso, ed il coefficiente moltiplicativo della coppia rigeneratrice è pari a 0,8.

7.6.1 – Analisi del profilo di velocità

Il primo grafico che viene analizzato per la sesta simulazione, riportato in Figura 107, mostra il confronto tra i profili di velocità del ciclo WLTP e della vettura simulata tramite il modello: la curva blu indica il ciclo WLTP come da normativa, mentre la curva rossa indica il profilo di velocità che viene seguito dal veicolo durante la simulazione. Da questo primo confronto, si nota che l'andamento del profilo di velocità del modello simulato, segue coerentemente il profilo di velocità del ciclo di riferimento WLTP fino al sedicesimo ciclo, ovvero per un numero di cicli uguale a quelli riportati nella prova 2, e presentano anche gli stessi valori in modulo, in quanto vengono compensati gli effetti legati all'introduzione della logica dell'e-Pedal (con l'inserimento delle due nuove condizioni), e l'aumento del coefficiente moltiplicativo della massima coppia rigenerabile, che passa da 0,8 a 1.

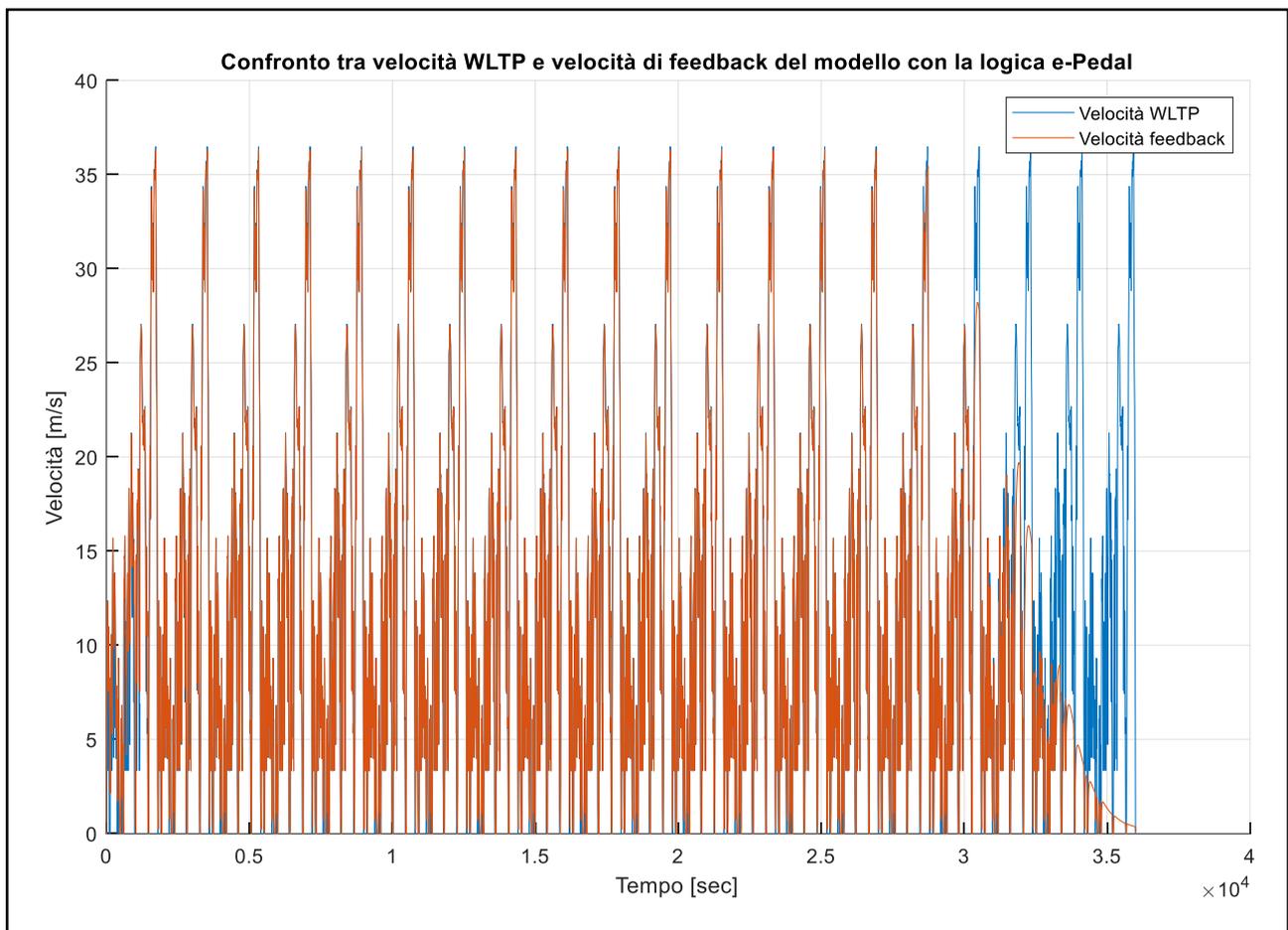


Figura 107 - Andamento dei profili di velocità della normativa e del modello Simulink

Viene inoltre riportato in Figura 108 il momento in cui il profilo di velocità del modello simulato non rispecchia più il profilo di velocità del ciclo di riferimento, in concomitanza del diciassettesimo ciclo WLTP.

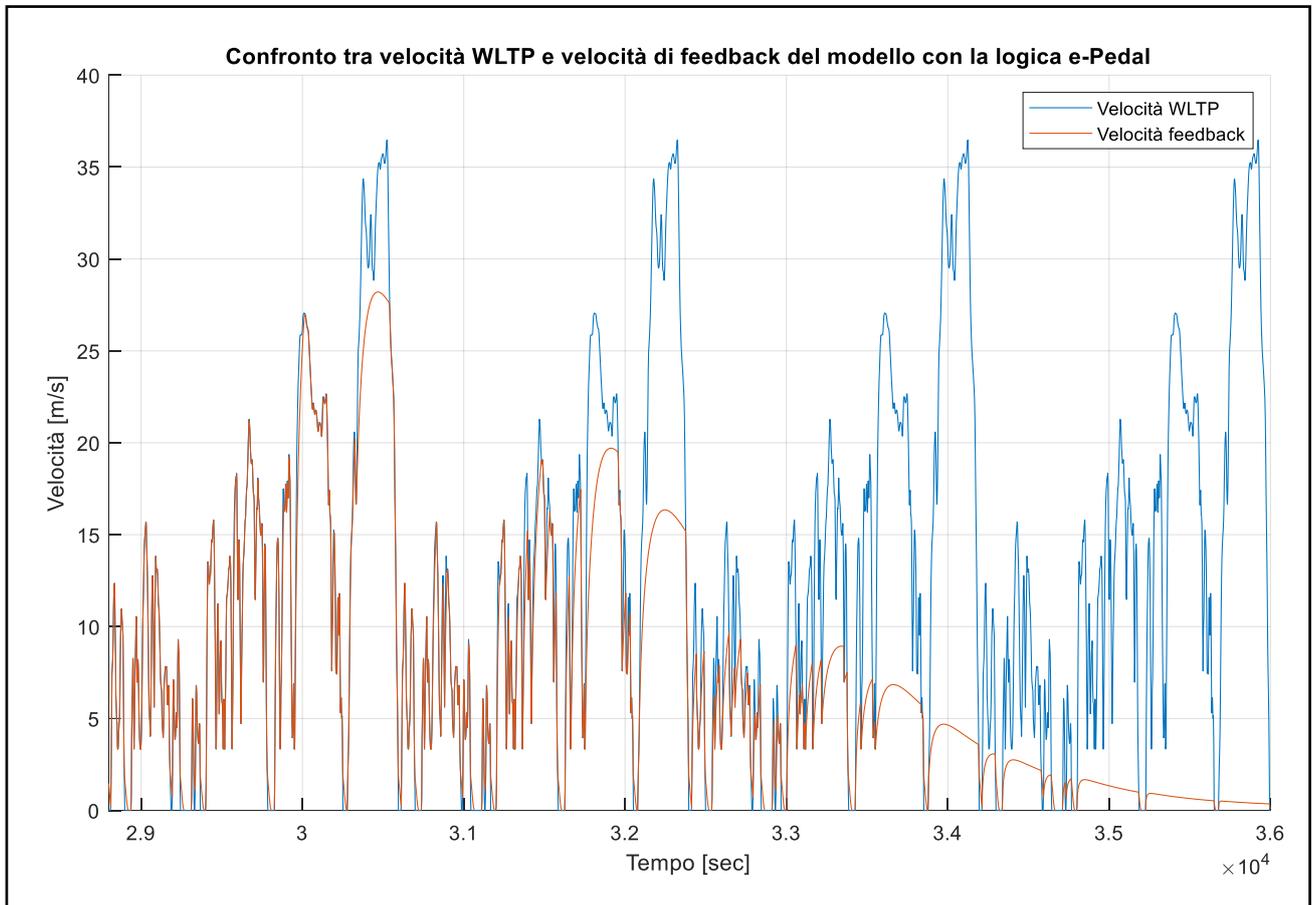


Figura 108 - Andamento del profilo di velocità sugli ultimi cicli WLTP

7.6.2 – Richiesta di accelerazione e frenata

Nel grafico riportato in Figura 109, viene mostrata la richiesta di accelerazione e di decelerazione in percentuale, con un valore medio dell'accelerazione pari al 50% della richiesta massima, simile a quanto riportato per tutte le altre prove, mentre per quanto riguarda la curva relativa alla decelerazione, in questa nuova configurazione si raggiunge una condizione di regime in un lasso di tempo inferiore rispetto a quanto riportato nella prova 2, ovvero dopo solamente tre cicli, anziché quattro (per la seconda prova). Inoltre, il valore medio della decelerazione per questa prova si attesta sul 25%, mentre per quanto riguarda la prova 2, si attesta intorno al 30% della richiesta massima. Anche in questa nuova configurazione, seppur per piccoli intervalli di tempo, la richiesta di decelerazione raggiunge un valore pari al 100%, in corrispondenza di quei tratti del percorso in cui la velocità del veicolo risulta inferiore al valore di attivazione della frenata rigenerativa (definito nella lookup table e pari a 2 m/s), al di sotto del quale il veicolo non ha modo di rallentare se non per la propria inerzia. Per questo motivo, in questi frangenti viene richiesta una coppia frenante elevata, ma che non viene fornita a causa dell'assenza del freno tradizionale dissipativo e della limitazione della coppia frenante introdotta dalla logica dell'e-Pedal.

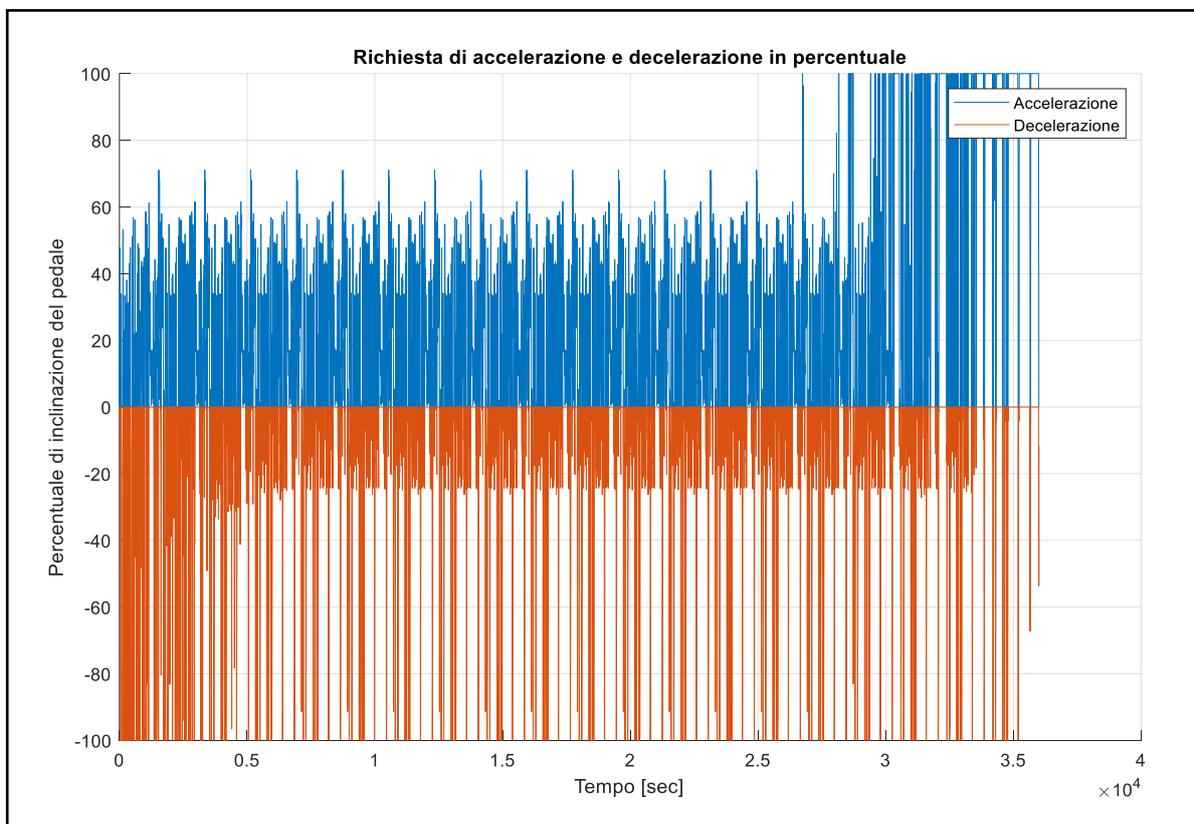


Figura 109 - Richiesta di accelerazione e di decelerazione per il percorso completo

7.6.3 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice

Le differenze emerse dal confronto tra la richiesta di coppia frenante della prova 6 con la prova 2, si riscontrano anche nel confronto tra la Figura 110 e la Figura 71, nelle quali viene visualizzato il confronto tra la coppia frenante richiesta e la massima coppia rigeneratrice utilizzabile in fase di decelerazione. Nello specifico, i valori medi della coppia massima rigeneratrice rimangono inalterati per entrambi i casi, mentre varia la rapidità con la quale viene raggiunta la condizione di regime: in questa prova, tale condizione viene raggiunta già a partire dall'inizio del quarto ciclo, mentre nella seconda prova tale condizione viene raggiunta solo nel quinto ciclo. Per quanto riguarda l'andamento della coppia frenante richiesta, presenta lo stesso valore di picco per entrambe le prove e nei primi cicli percorsi, mentre dal momento in cui viene raggiunta la condizione di regime in poi, il suo valore medio per la sesta prova risulta inferiore rispetto alla seconda prova, rispettivamente 120 Nm e 150 Nm, perché in questa nuova configurazione il coefficiente che moltiplica la coppia massima rigeneratrice viene incrementato, passando da 0,8 ad 1, con conseguente diminuzione della coppia frenante richiesta al veicolo in fase di decelerazione.

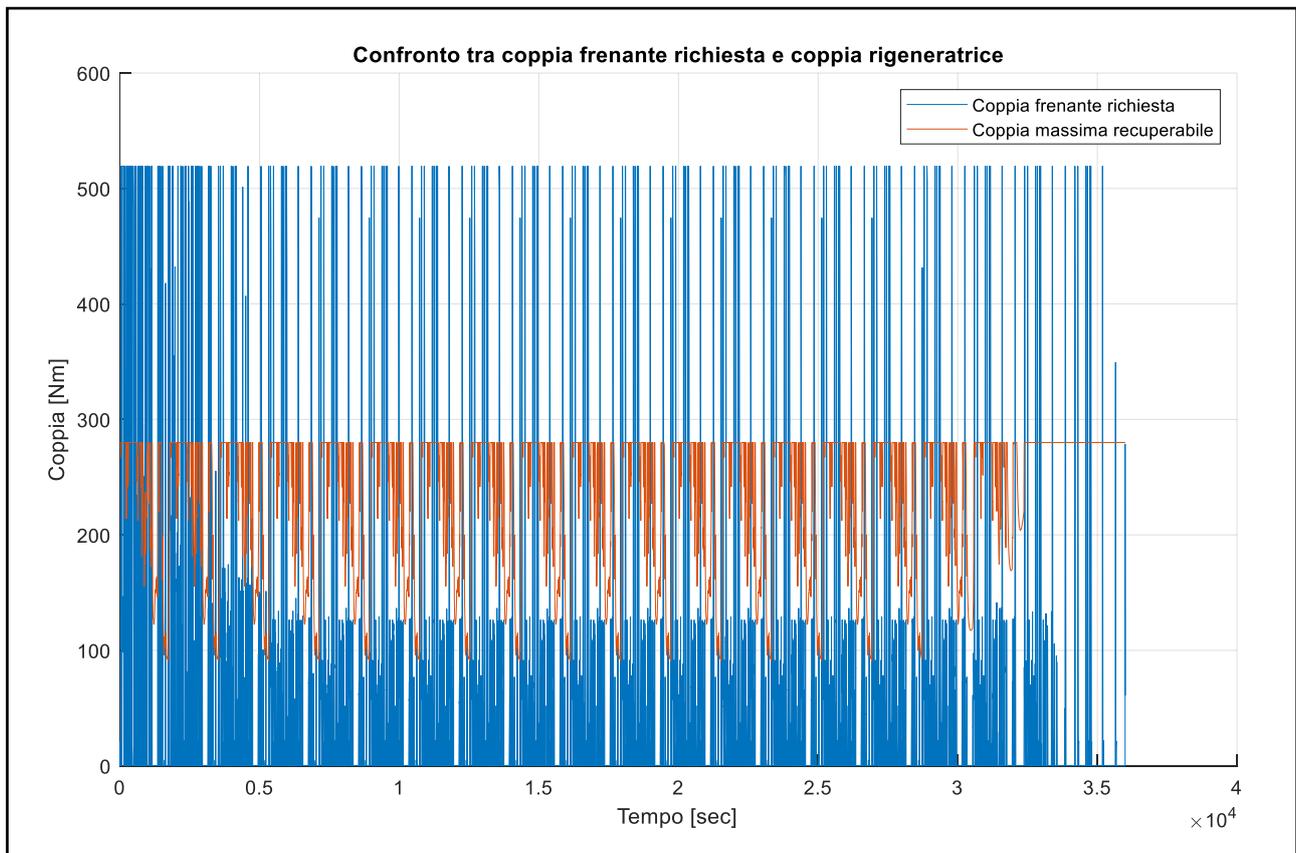


Figura 110 - Confronto tra coppia frenante richieste e coppia massima rigeneratrice

7.6.4 – Coefficiente globale di rigenerazione

Il coefficiente globale di rigenerazione mostrato in Figura 111, presenta già nei primi cicli dei picchi che raggiungono il valore unitario, a causa della forte richiesta di frenata mostrata in Figura 109, per poi proseguire con andamenti simili a quelli visti per le altre prove, una volta raggiunta la condizione di regime.

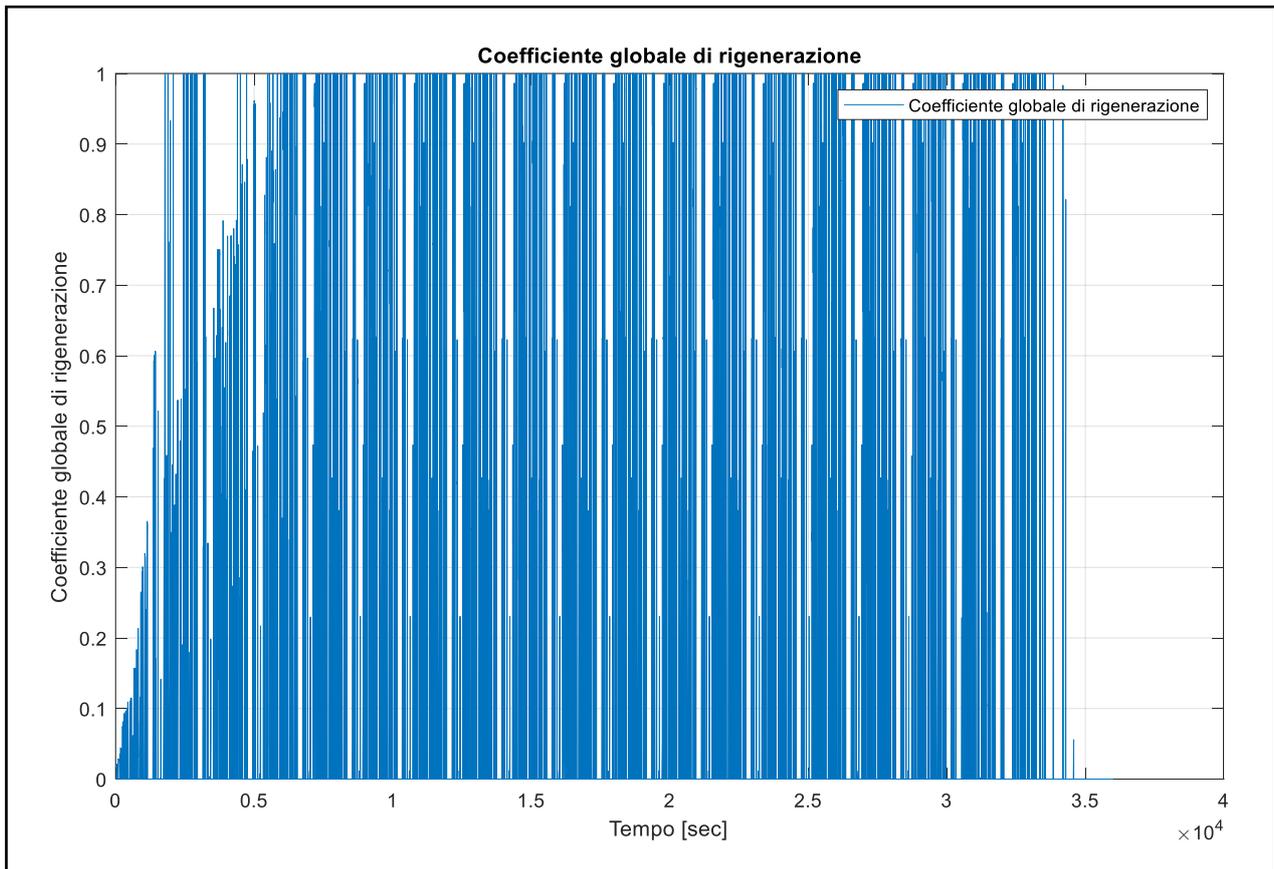


Figura 111 – Coefficiente globale di rigenerazione

7.6.5 – Coppia frenante rigeneratrice

Analizzato l'andamento del coefficiente globale rigenerativo e della massima coppia recuperabile in fase di decelerazione, si intuisce che l'andamento della coppia rigeneratrice recuperata effettivamente corrisponde all'andamento della richiesta di coppia frenante, ad eccezione dei primi tre cicli WLTP, in cui il coefficiente globale rigenerativo è ancora limitato, come mostrato in Figura 112. Oltre il terzo ciclo, si ha una ripetizione periodica dei valori di picco della coppia frenante richiesta, che non vengono soddisfatti dalla frenata rigenerativa, e devono quindi essere compensati per mezzo della frenata dissipativa. Questo fenomeno accade principalmente negli intervalli di tempo in cui velocità del veicolo è inferiore al limite minimo di soglia per l'attivazione della logica dell'e-Pedal, la quale inibisce la frenata rigenerativa sotto i 2 m/s. Inoltre, in questa simulazione la frenata dissipativa non è attiva, per cui il veicolo frenerà solo per inerzia, una volta che si troverà al di sotto di tale valore di soglia appena descritto.

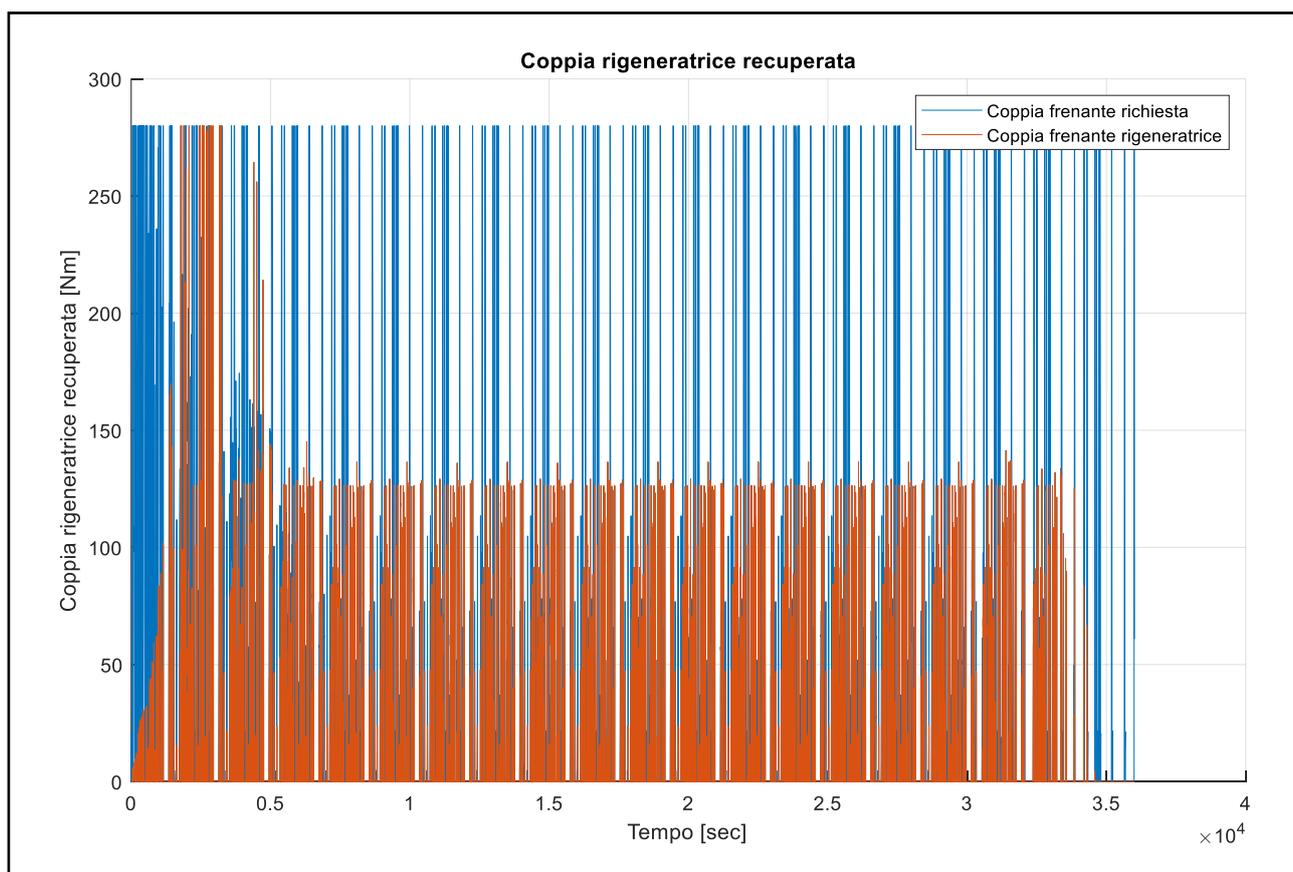


Figura 112 – Coppia frenante rigenerativa effettiva

7.6.6 – Coppia frenante dissipativa

La coppia dissipativa, come appena accennato, dovrebbe entrare in gioco solo nel caso in cui la frenata rigeneratrice non risultasse sufficiente a fornire tutta la coppia frenante necessaria per la decelerazione richiesta dal conducente, come mostrato in Figura 113, ma in questa sesta prova, il freno dissipativo è stato disabilitato, lasciando di fatto il sistema di frenata rigenerativa come unico mezzo per far decelerare il veicolo quando richiesto.

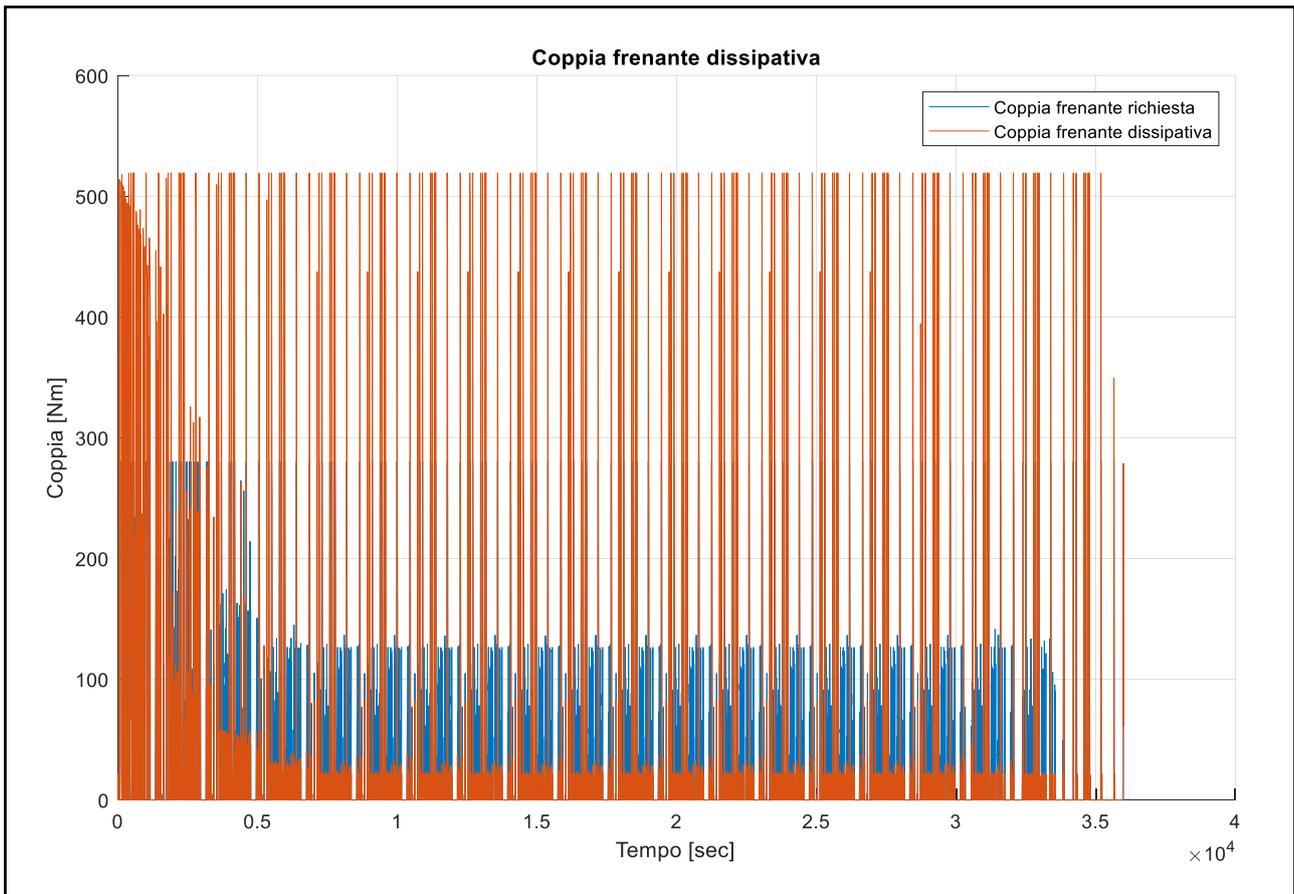


Figura 113 – Coppia frenante dissipativa

7.6.7 – State of charge

Il grafico dello state of charge rappresentato in Figura 114, mostra l'andamento della carica residua della batteria del veicolo durante tutto il percorso, con un valore iniziale dello SOC pari al 100% per le condizioni di progetto, fino all'arresto della vettura, stimato al 2% di carica residua. Anche in questo grafico, come in quello della prova 2, vi è una diminuzione dello state of charge che si ripete ciclicamente, con lo stesso andamento, per ogni ciclo WLTP percorso, fino all'esaurimento totale della batteria. Si nota un'anomalia, presente negli ultimi tratti del percorso, per valori inferiori al 5% dello state of charge, in cui l'andamento dello stesso, non rispecchia quello visto nei cicli precedenti, a causa del basso livello di carica residua della batteria. Nello specifico, il livello di state of charge pari al 2% viene raggiunto dopo aver viaggiato per 32.299 secondi, pari a circa 9 ore consecutive di viaggio, rispetto ai 32.289 secondi della prova 2, quindi con un incremento dell'autonomia di soli dieci secondi, corrispondenti a 129 metri. La differenza tra la prova 2 e la prova 6 è quindi trascurabile. Se ne deduce che l'aggiunta delle due condizioni nella logica dell'e-Pedal, compensa l'aumento del fattore moltiplicativo relativo alla massima coppia rigenerabile in fase di decelerazione.

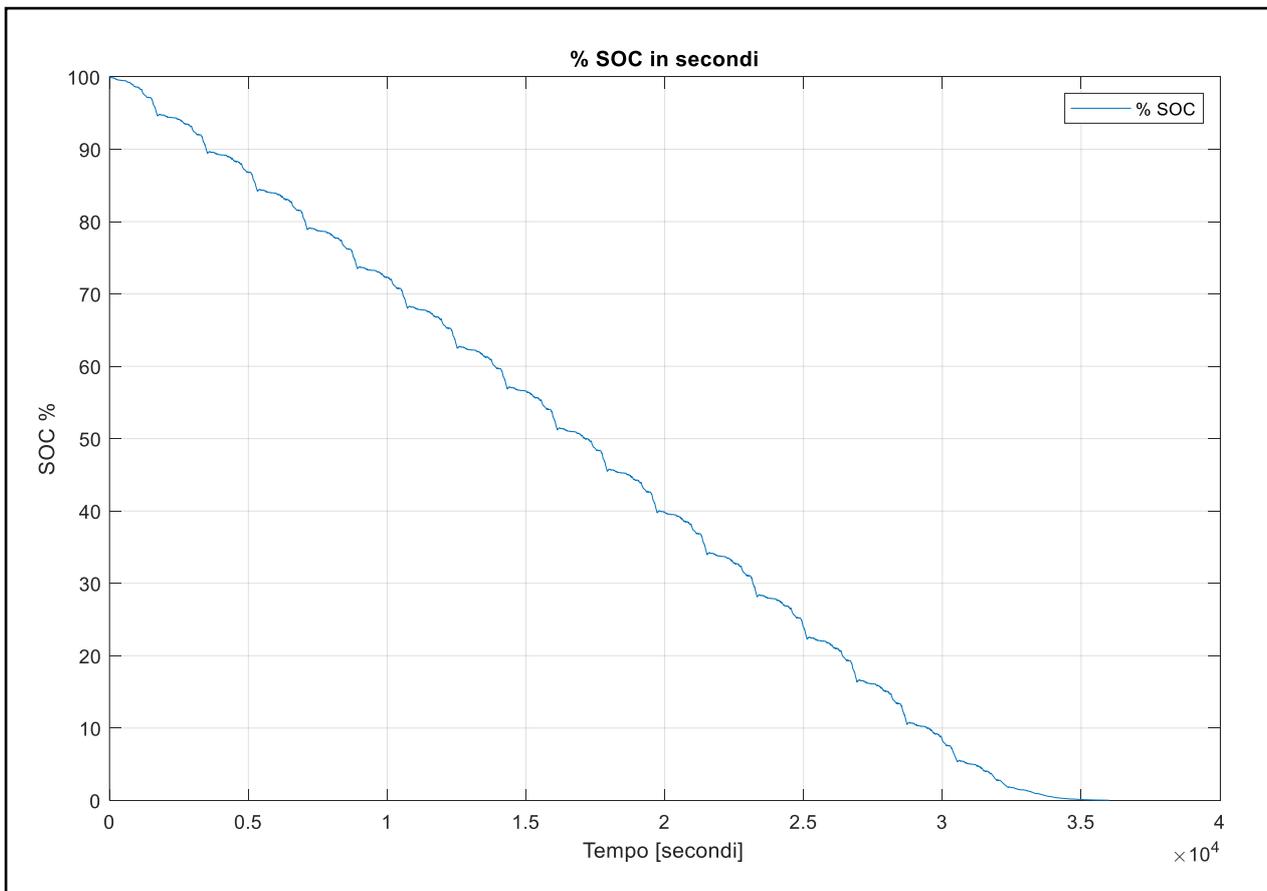


Figura 114 – Andamento dello State of Charge

7.6.8 – Conclusioni relative alla prova 6

Anche la prova 6, come la prova 2, ha dimostrato che eliminando la frenata tradizionale dissipativa, la sola coppia rigenerativa non è sufficiente per decelerare quanto richiesto dal conducente, dato che in questa nuova configurazione non riesce a seguire coerentemente il profilo della velocità di riferimento del ciclo WLTP.

Infatti, si è visto come la coppia rigeneratrice che era possibile utilizzare per la decelerazione della vettura non era sufficiente, e veniva quindi generata una richiesta supplementare di coppia frenante che però non poteva essere soddisfatta, dato che non era presente l'impianto frenante dissipativo.

Pertanto, si può ritenere questa configurazione non valida ai fini dell'implementazione su un veicolo reale, dato che non sarebbe in grado di rispondere coerentemente alle richieste del conducente, dato che per velocità inferiori ai 2 m/s il veicolo non è in grado di frenare, non garantendo la sicurezza dei passeggeri.

8 – Sistema e-Pedal applicato ad un percorso reale

8.1 – Introduzione

Finora sono state analizzate delle casistiche che facevano riferimento al ciclo WLTP classe 3, per verificare l'autonomia dei veicoli. Tuttavia, questa ipotesi di base porta con sé dei limiti, legati al fatto che tale normativa non prescrive la tipologia del percorso da seguire, ma fornisce solo dei valori di velocità e di accelerazione che il veicolo è tenuto a rispettare. Questo implica che eventuali ostacoli o imprevisti quali il traffico, attraversamenti pedonali, semafori, rotonde, o altri ancora, non sono considerati all'interno delle simulazioni che sono state effettuate. Pertanto, è stato ritenuto opportuno eseguire di persona una prova su strada, seppur un profilo di velocità e di accelerazione diversi da quelli riportati in normativa, in modo da verificare l'effettivo funzionamento del sistema e-Pedal.

Secondo questa logica, grazie all'applicazione GPS_Prune, è stato monitorato un tragitto percorso in macchina, lungo il quale è stata rilevata la posizione del veicolo ad intervalli regolari di un secondo, ed è stato dedotto il profilo di velocità del veicolo, necessario per eseguire la simulazione con il modello. Quest'ultimo è stato esportato in ambiente Simulink come dato di input per la simulazione, e sono stati elaborati gli stessi grafici utilizzati nelle simulazioni precedenti per descrivere il comportamento del veicolo, e di come la logica dell'e-Pedal influisca sullo state of charge finale del veicolo e sull'autonomia. Nello specifico, vengono in seguito mostrati due casi di studio, relativi al medesimo profilo di velocità, in cui il primo adotta la medesima logica dei veicoli elettrici tradizionali, mentre il secondo adotta tutte le logiche del sistema e-Pedal. In questo modo è possibile effettuare un confronto diretto tra le due strategie di gestione della ricarica, per un percorso reale, in modo da poterne trarre delle conclusioni quanto più vicine alla realtà.

8.2 – Simulazione di un veicolo elettrico tradizionale

8.2.1 – Introduzione

Il primo caso studio, prende in analisi il percorso rilevato tramite l'applicazione GPS_Prune, e con il relativo profilo di velocità esportato in ambiente Matlab, esegue le simulazioni prendendo come dato di input il profilo di velocità registrato dal veicolo reale durante il test, della richiesta di accelerazione e decelerazione, la corrispondente coppia frenante richiesta e la coppia massima rigenerabile, la coppia dissipativa utilizzata, il coefficiente globale di rigenerazione, e lo state of charge del veicolo, durante tutta il percorso.

Nello specifico, per questa prova il modello Simulink viene impostato come descritto nel seguito:

- La logica del sistema e-Pedal è disabilitata;
- I freni tradizionali, ovvero quelli dissipativi sono abilitati;
- Il coefficiente di riduzione della frenata rigenerativa è pari a 0,8;
- Lo state of charge iniziale della batteria del veicolo è pari al 70%.

Il livello di state of charge pari al 70% è una scelta di progetto, dovuto al fatto che la lookup table qui implementata relativa a tale parametro, elabora come dato in output il coefficiente rigenerativo unitario solo quando il livello dello state of charge sia minore o uguale al 70%. In questo modo viene simulata la condizione equivalente alla massima efficiente della frenata rigenerativa, in cui non ci sono diminuzione della carica ripristinata ad opera del coefficiente rigenerativo suddetto.

8.2.2 – Analisi del profilo di velocità

I profili di velocità che vengono di seguito rappresentati in Figura 115, sono relativi al tracciato che realmente è stato percorso (curva blu), e al profilo di velocità che il modello Simulink è riuscito ad elaborare come dato di feedback, e con il quale ha lavorato (curva rossa). Si nota quindi come i due profili combacino per tutti gli istanti di tempo in cui è stata eseguita la rilevazione, ad eccezione di rari picchi locali di velocità che il modello simulato non è riuscito a raggiungere (verso metà percorso), ma che possono essere considerati trascurabili. In generale quindi si può affermare che il profilo di velocità elaborato dal modello Simulink rispecchia quello che effettivamente è stato percorso.

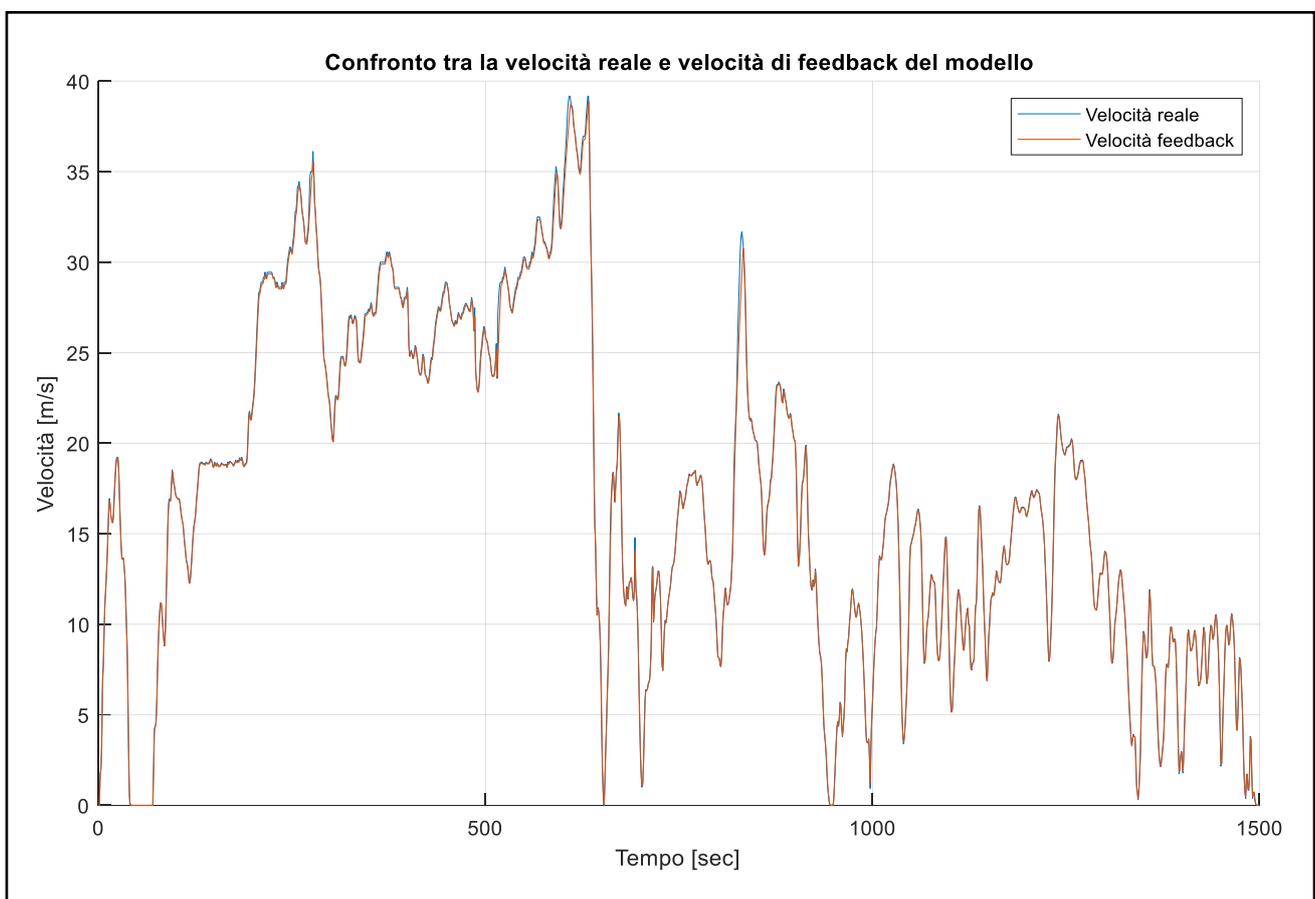


Figura 115 – Andamento del profilo di velocità reale e del modello simulato

8.2.3 – Richiesta di accelerazione e frenata

Come già visto nelle precedenti simulazioni, viene ora mostrata in Figura 116 la richiesta di accelerazione e di decelerazione, elaborate dal modello Simulink in funzione del profilo di velocità fornito in ingresso. Si nota in particolare come i picchi relativi alla richiesta di accelerazione o di decelerazione, si trovino in corrispondenza dei tratti maggiormente inclinati (quasi verticali) presenti nel profilo di velocità. Questo, perché viene rilevata una grande variazione del modulo della velocità in un lasso di tempo relativamente breve, e pertanto viene richiesta una elevata coppia motrice (o frenante), per soddisfare tale richiesta.

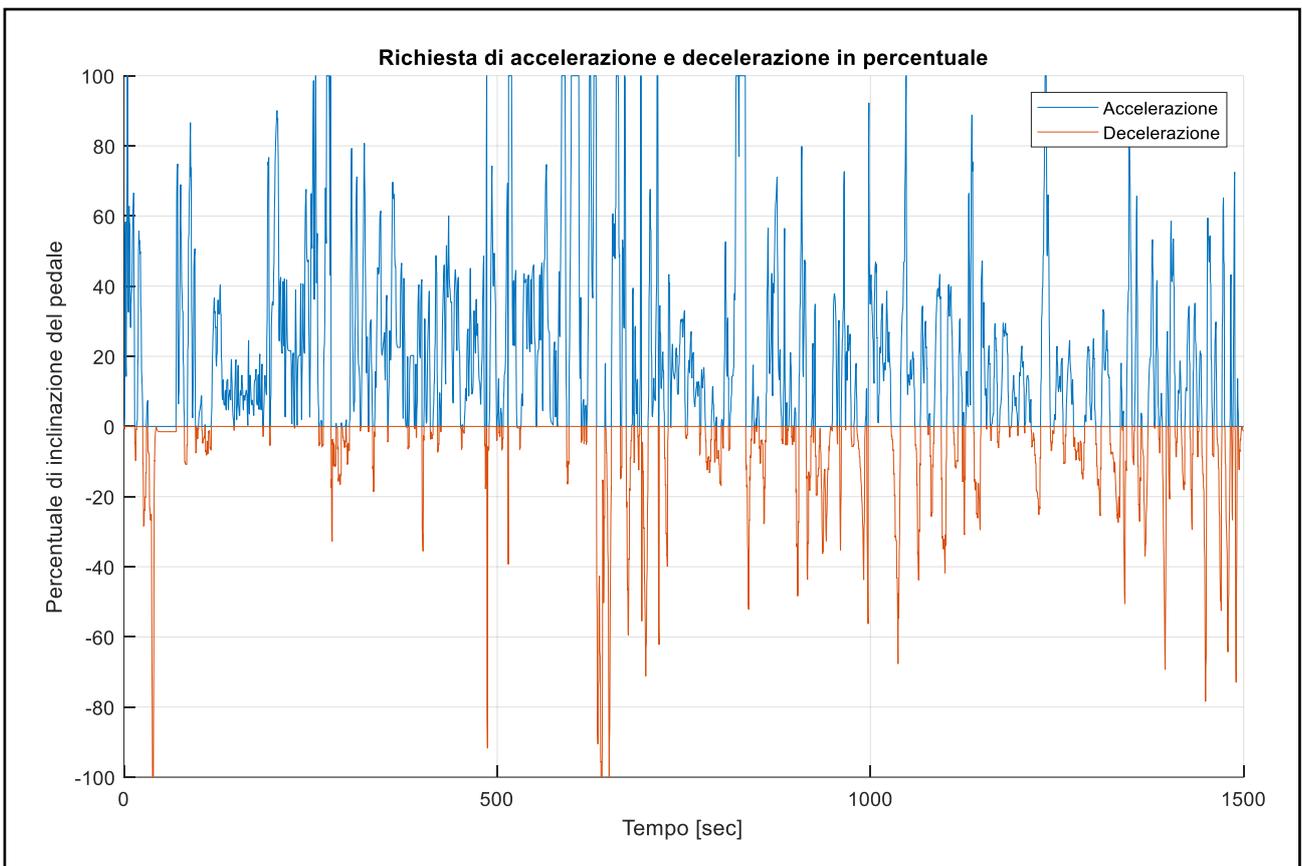


Figura 116 – Richiesta di accelerazione e di frenata

8.2.4 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice

Si riportano in Figura 117 gli andamenti della richiesta di coppia frenante e della massima coppia rigeneratrice che il veicolo riesce ad utilizzare in fase di decelerazione. Nello specifico, si osserva che per la maggior parte del tempo, la coppia rigeneratrice riesce a soddisfare la richiesta di coppia frenante, in modo tale da poter ottimizzare la rigenerazione attraverso la fase di frenata, per incrementare lo state of charge. Vi sono tuttavia degli intervalli di tempo, seppur piccoli, in cui la richiesta di coppia frenante non viene soddisfatta e si dovrà quindi ricorrere alla frenata classica dissipativa, per poter garantire la decelerazione richiesta dal conducente.

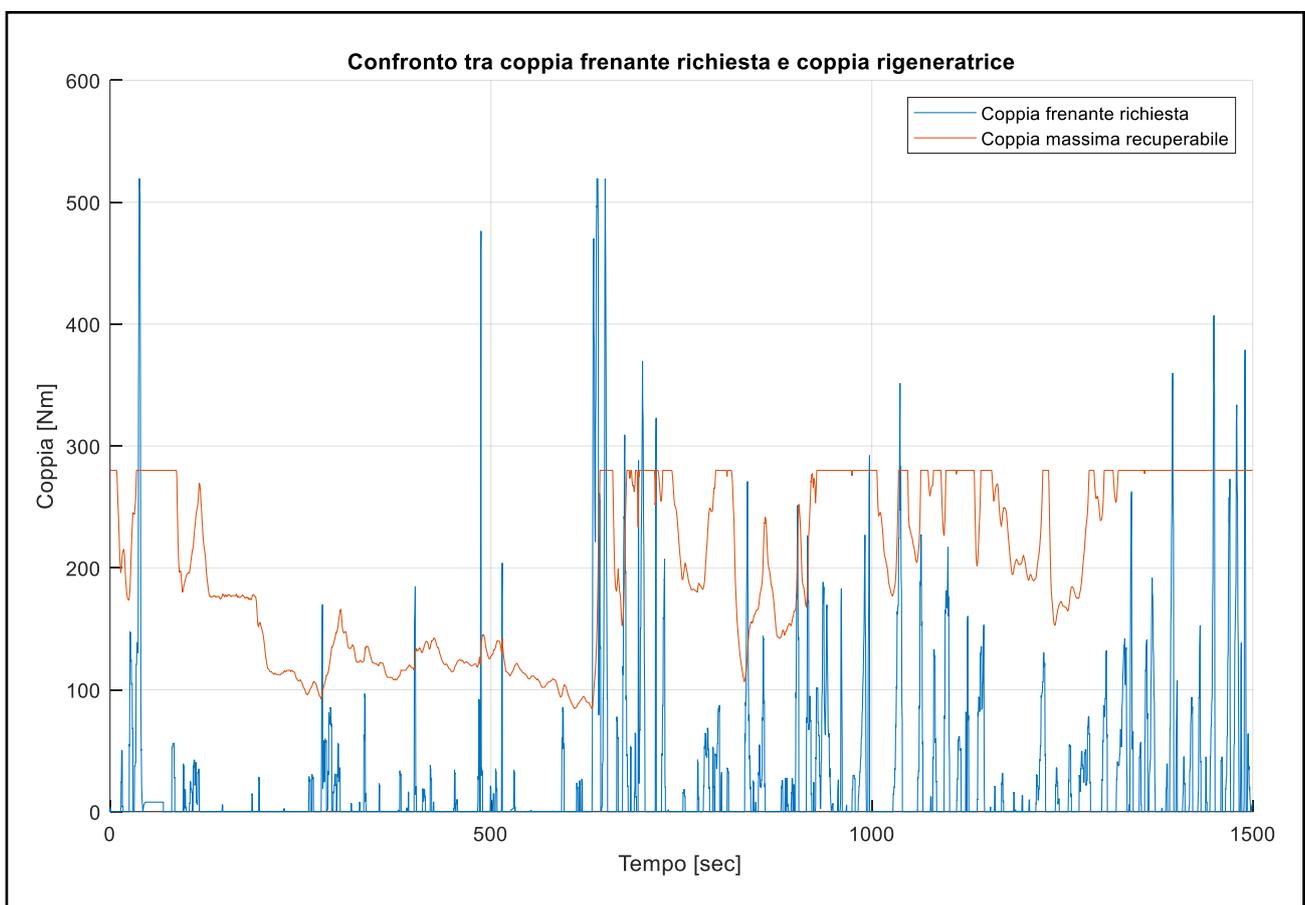


Figura 117 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia massima rigeneratrice

Viene inoltre mostrato in dettaglio il confronto tra le coppie frenanti nell'intervallo di tempo compreso tra i 600 secondi ed i 750 secondi in Figura 118, in cui si registra il picco di richiesta di coppia frenante, ma che non il veicolo non riesce a soddisfare con la sola frenata rigenerativa.

Questi valori di picco si manifestano in corrispondenza della brusca variazione di velocità riportata nel profilo di velocità, a conferma del fatto che il conducente richiede al veicolo una elevata decelerazione, che però potrà essere soddisfatta solo dall'intervento della frenata dissipativa tradizionale.

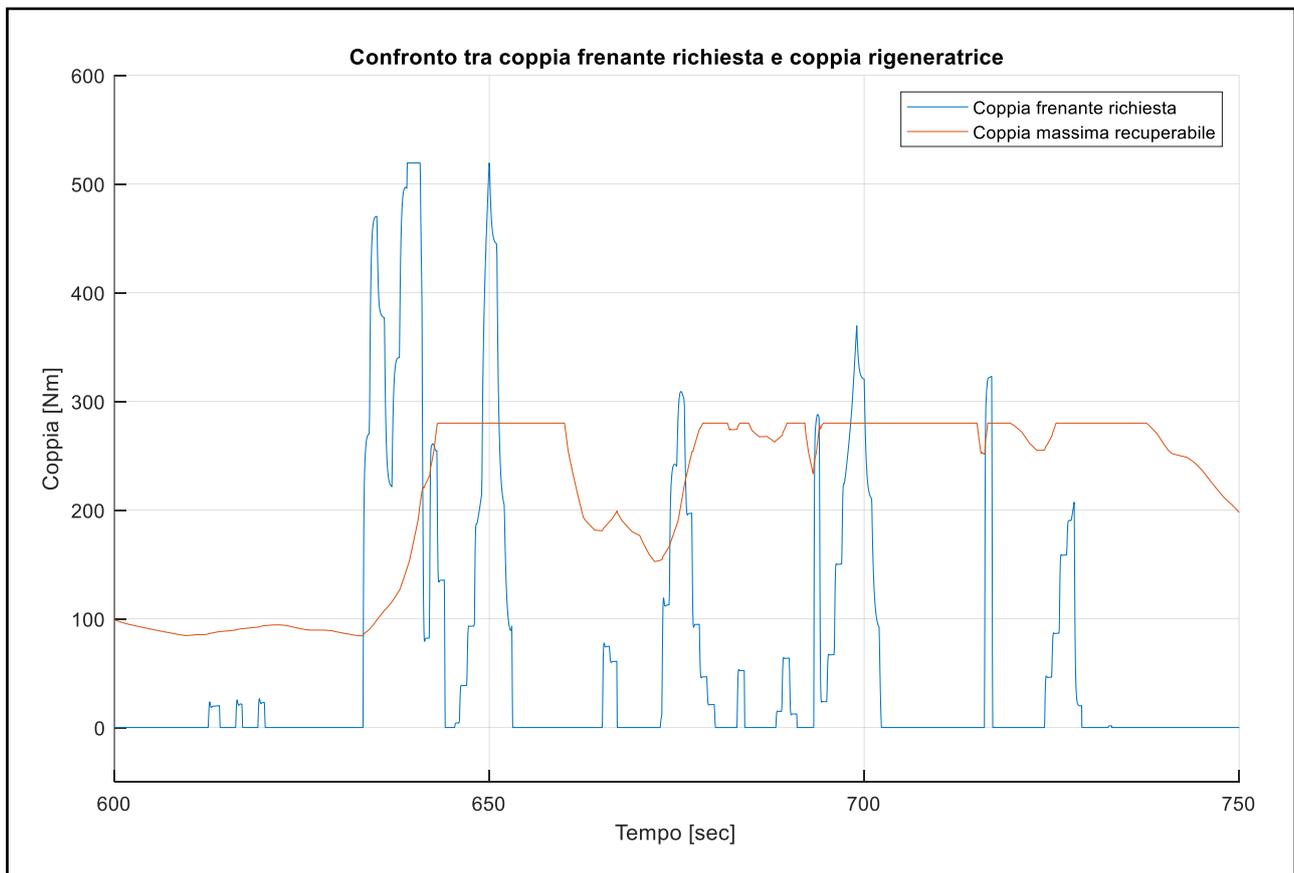


Figura 118 – Dettaglio del confronto tra le coppie frenanti

8.2.5 – Coefficiente di rigenerazione

Viene ora analizzato il coefficiente globale di rigenerazione, che servirà per determinare l'effettiva coppia rigeneratrice che il veicolo sarà in grado di utilizzare per ripristinare lo state of charge. Anche in questo caso viene valutato come prodotto dei due coefficienti di rigenerazione implementati nel modello originale Simulink del veicolo elettrico (senza la logica dell'e-Pedal), ed il suo andamento viene riportato in Figura 119.

Il suo andamento risulta per la maggior parte del tempo con un valore in modulo unitario, ad eccezione di quei tratti del percorso in cui la velocità del veicolo scende al di sotto della soglia minima per l'attivazione della frenata rigenerativa, il cui valore limite corrisponde ai 5 m/s, come precedentemente illustrato per la lookup table originale del modello. Si nota infatti come il suo andamento sia strettamente correlato con il profilo di velocità mostrato in Figura 115, in funzione dei valori inseriti all'interno della lookup table relativa alla velocità.

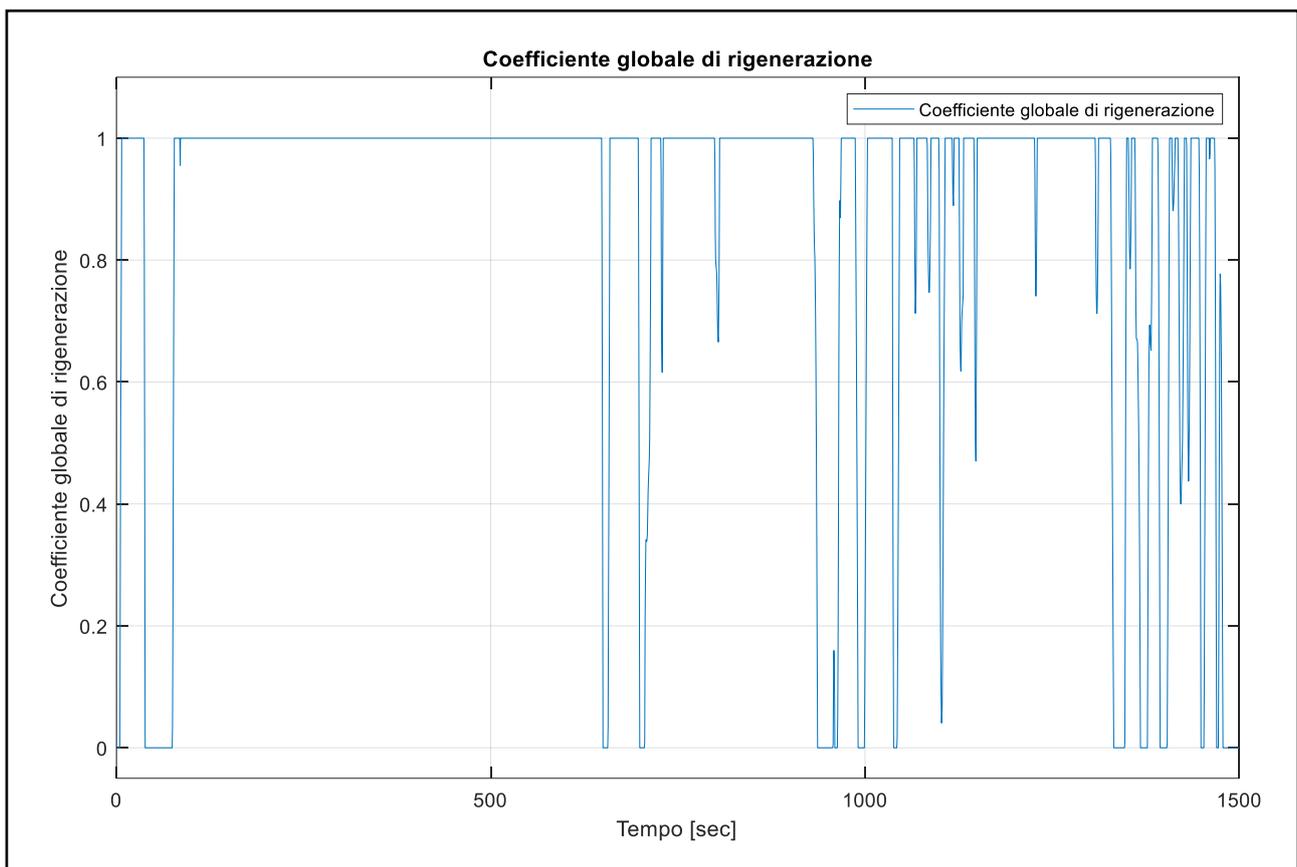


Figura 119 – Coefficiente globale di rigenerazione

8.2.6 – Coppia rigeneratrice

Di seguito in Figura 120, vengono riportati gli andamenti relativi alle curve che descrivono la coppia massima rigeneratrice, e la coppia rigeneratrice che effettivamente può essere esercitata dal veicolo, data dal prodotto tra la prima coppia massima rigeneratrice, ed il coefficiente globale di rigenerazione.

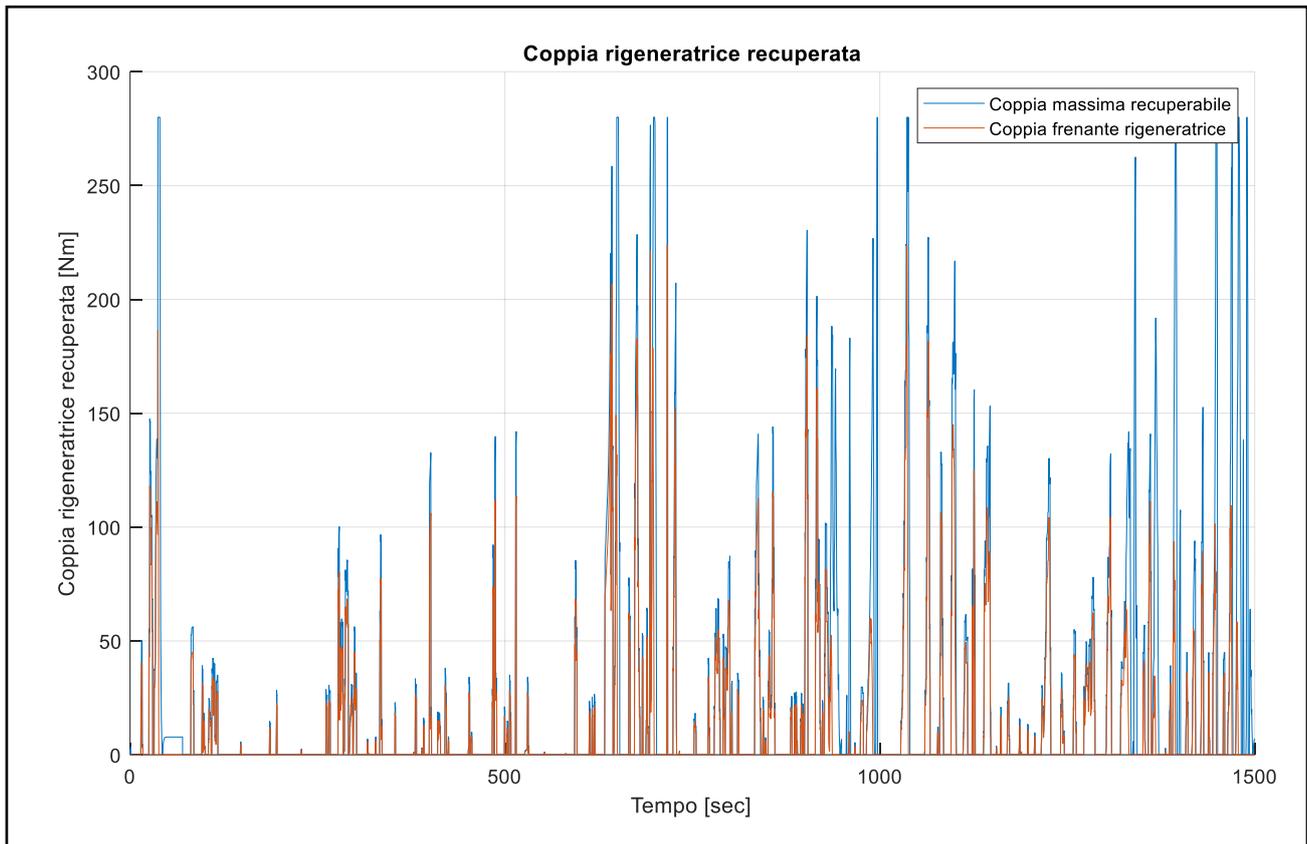


Figura 120 – Coppia effettiva rigenerata

Per avere una migliore comprensione dell'andamento della coppia effettiva esercitata per la rigenerazione, viene mostrato in Figura 121 un dettaglio di Figura 120, relativo all'intervallo di tempo compreso tra i 600 secondi ed i 750 secondi, in cui viene mostrato l'effetto che il coefficiente moltiplicativo pari a 0,8 comporta sull'intensità della coppia frenante rigeneratrice effettivamente esercitata dal veicolo. Infatti si nota come essa sia nettamente inferiore rispetto a quella massima che è possibile utilizzare.

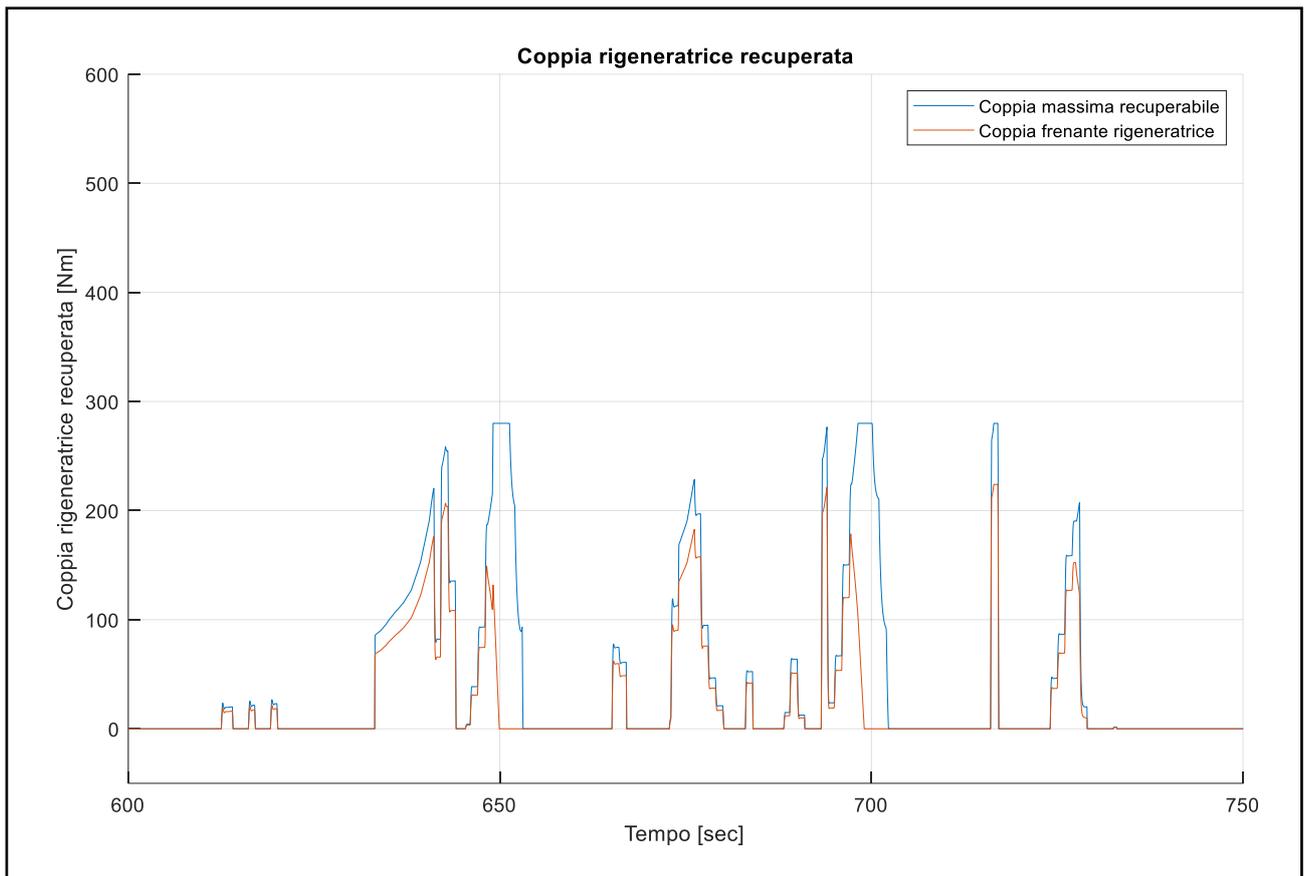


Figura 121 – Dettaglio del confronto tra la coppia massima rigeneratrice e quella effettiva

8.2.7 – Coppia dissipativa

Viene infine mostrato l'andamento della coppia dissipativa in Figura 122, relativa al freno tradizionale, che viene utilizzata nel momento in cui la sola coppia frenante rigeneratrice non dovesse essere in grado di soddisfare tutta la richiesta di coppia frenante imposta dal conducente.

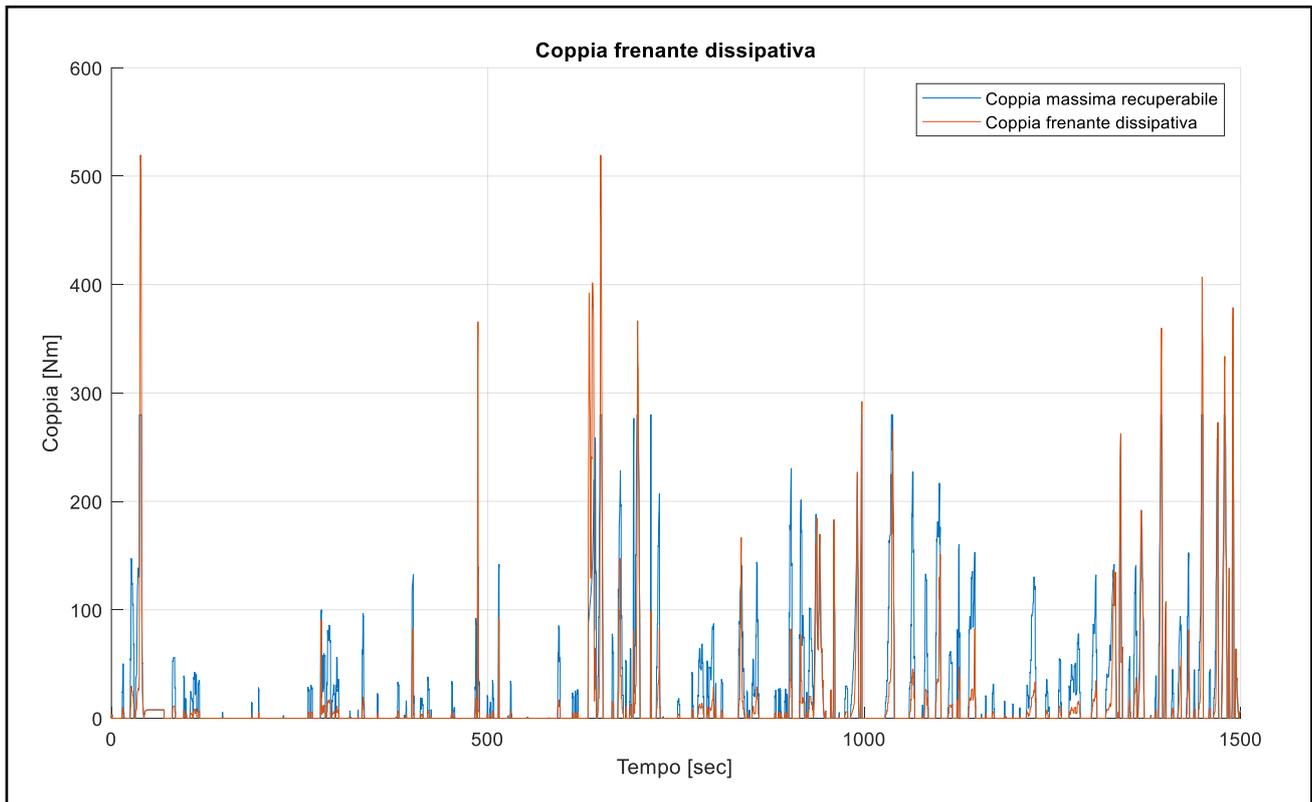


Figura 122 – Andamento della coppia frenante dissipativa

Viene anche in questo caso riportato in dettaglio cosa accade per l'intervallo di tempo compreso tra i 600 secondi ed i 750 secondi, in cui si ha il picco di richiesta di coppia frenante da parte del conducente, e deve entrare in azione anche la coppia dissipativa per garantire una decelerazione coerente con quella richiesta. In Figura 123 viene quindi mostrato quanto appena accennato, e si nota come la coppia frenante dissipativa entri in gioco nello stesso istante di tempo della coppia rigeneratrice, al fine di generare una coppia totale frenante pari a quella richiesta.

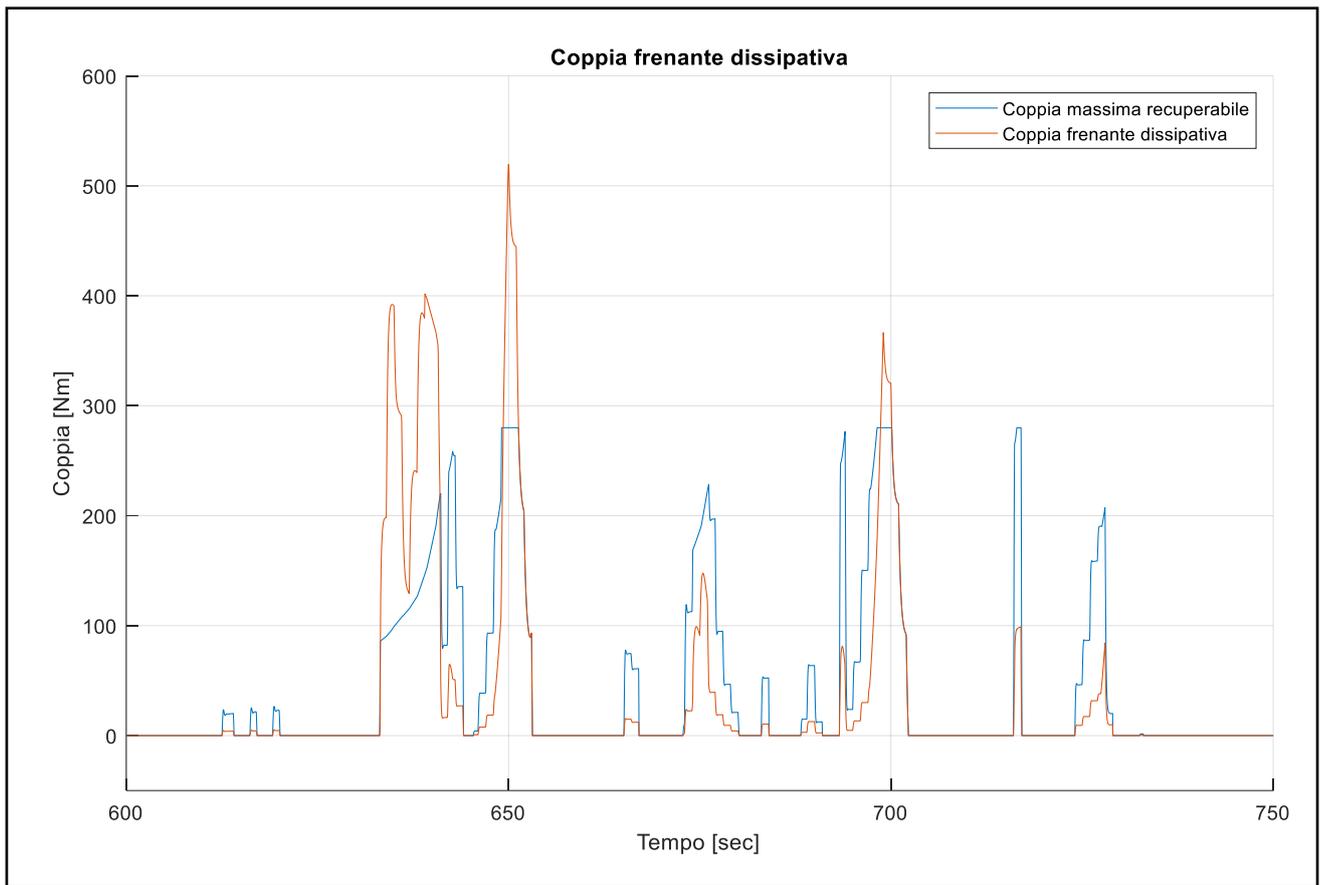


Figura 123 - Dettaglio del confronto tra la coppia massima rigeneratrice e quella dissipativa

8.2.8 – State of charge

Come ultimo parametro analizzato, viene mostrato lo state of charge in Figura 124, valutato per tutta la durata del percorso. Come anticipato nell'introduzione, il suo valore iniziale viene fissato al 70%, per garantire la massima efficienza in fase di frenata, e dopo aver viaggiato per 25 minuti, pari alla durata totale del viaggio, si riscontra una diminuzione dello state of charge del 7,45%, portandolo di fatto ad un livello pari al 62,55%.

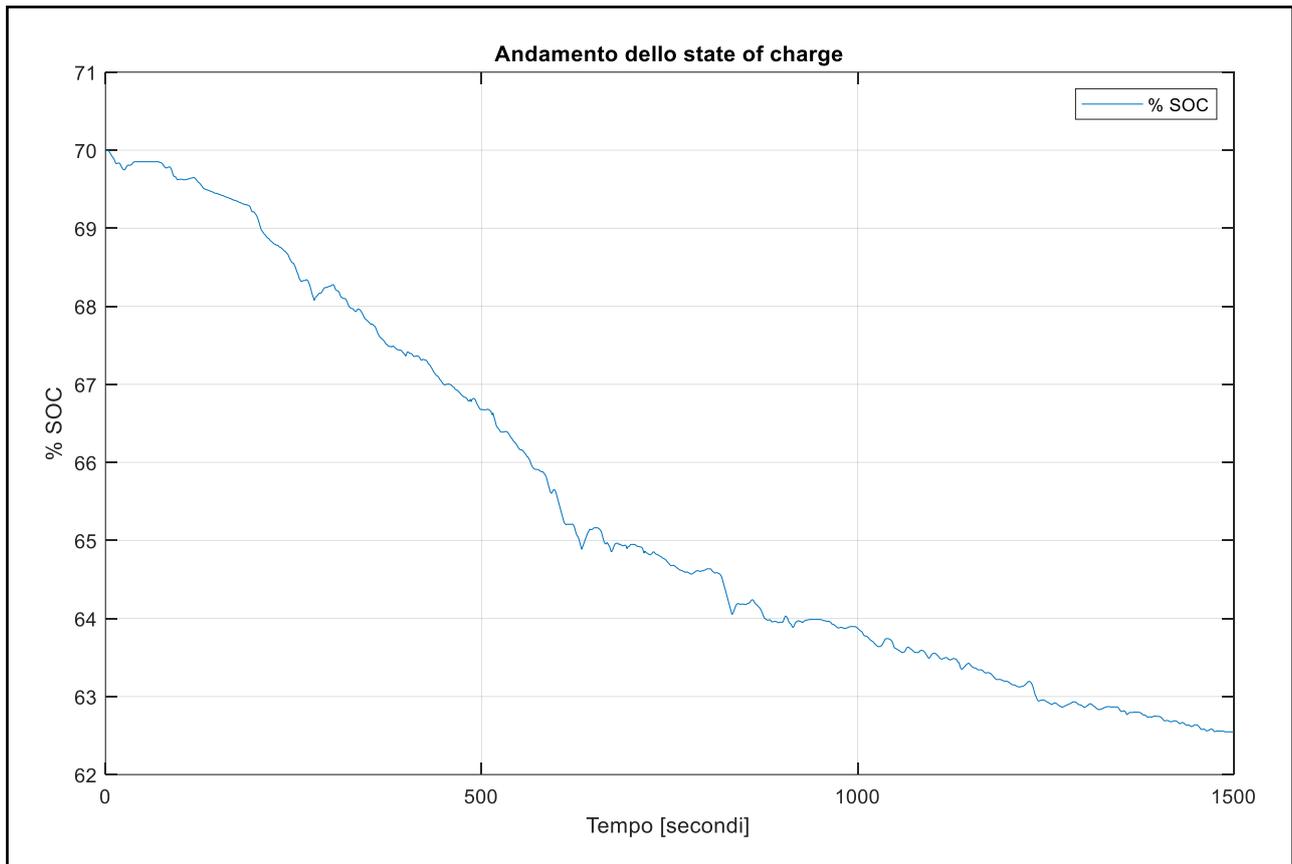


Figura 124 – State of charge valutato per tutto il percorso

8.3 – Simulazione di un veicolo elettrico con sistema e-Pedal

8.3.1 – Introduzione

Il secondo caso studio, prende in analisi lo stesso percorso analizzato per la prima prova, rilevato tramite l'applicazione GPS_Prune, ed il relativo profilo di velocità viene esportato in ambiente Matlab, dove vengono eseguite le stesse simulazioni fatte per il caso precedente, relative ai parametri di velocità e di accelerazione di feedback elaborata dal modello, alla coppia frenante richiesta dal conducente in fase di decelerazione, la coppia massima rigenerabile, la coppia dissipativa utilizzata, il coefficiente globale di rigenerazione, e lo state of charge del veicolo, durante tutta il percorso.

Nello specifico, per questa prova il modello Simulink viene impostato come descritto nel seguito:

- La logica del sistema e-Pedal è abilitata;
- I freni tradizionali, ovvero quelli dissipativi sono abilitati;
- Il coefficiente di riduzione della frenata rigenerativa è pari a 1;
- Lo state of charge iniziale della batteria del veicolo è pari all' 80%.

Il livello di state of charge pari all'80% è una scelta di progetto, dovuto al fatto che la lookup table qui implementata relativa a tale parametro, elabora come dato in output il coefficiente rigenerativo unitario solo quando il livello dello state of charge sia minore o uguale all'80%, come visto per il caso precedente. In questo modo viene simulata la condizione equivalente alla massima efficienza della frenata rigenerativa, in cui non ci sono limitazioni della carica ripristinata ad opera del coefficiente rigenerativo suddetto.

8.3.2 – Analisi del profilo di velocità

I profili di velocità che vengono di seguito rappresentati in Figura 125, sono relativi al profilo di velocità che realmente è stato percorso (curva blu), e al profilo di velocità che il modello Simulink è riuscito ad elaborare come dato di feedback, e con il quale ha lavorato (curva rossa). Si nota che anche in questa nuova configurazione, i due profili combaciano per tutti gli istanti di tempo in cui è stata eseguita la rilevazione, ad eccezione di picchi locali di velocità che il modello simulato non è riuscito a raggiungere (verso metà percorso), ma che possono essere considerati trascurabili. In generale quindi si può affermare che il profilo di velocità elaborato dal modello Simulink rispecchia quello che effettivamente è stato percorso.

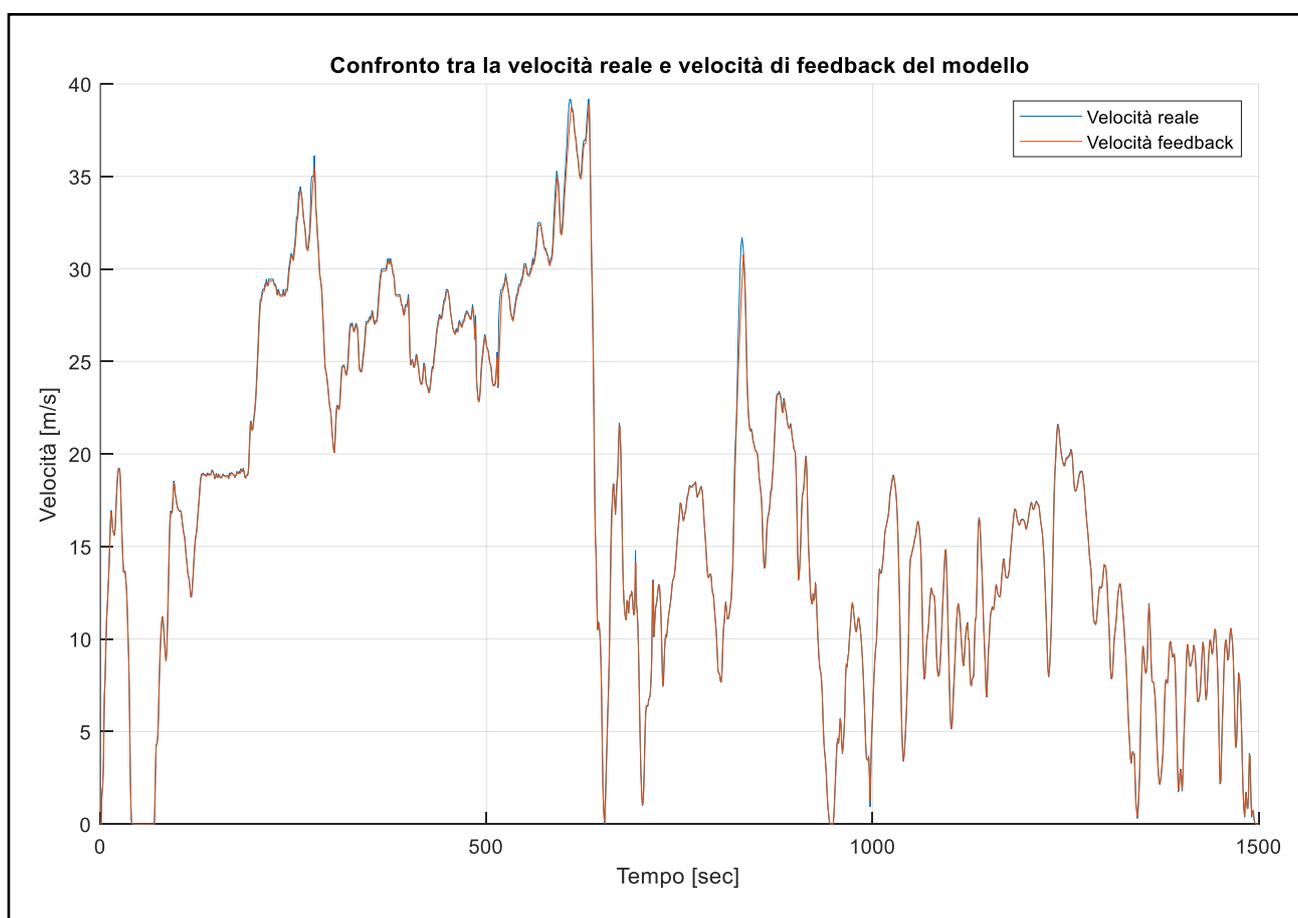


Figura 125 – Andamento del profilo di velocità reale e del modello simulato

8.3.3 – Richiesta di accelerazione e frenata

Come già visto nelle precedenti simulazioni, viene ora mostrata in Figura 126 la richiesta di accelerazione e di decelerazione, elaborate dal modello Simulink in funzione del profilo di velocità fornito in ingresso. Si nota in particolare come i picchi relativi alla richiesta di accelerazione (o di decelerazione), si trovino in corrispondenza dei tratti maggiormente inclinati (quasi verticali) presenti nel profilo di velocità. Questo, perché viene rilevata una grande variazione del modulo della velocità in un lasso di tempo relativamente breve, e pertanto viene richiesta una elevata coppia motrice (o frenante), per soddisfare tale richiesta.

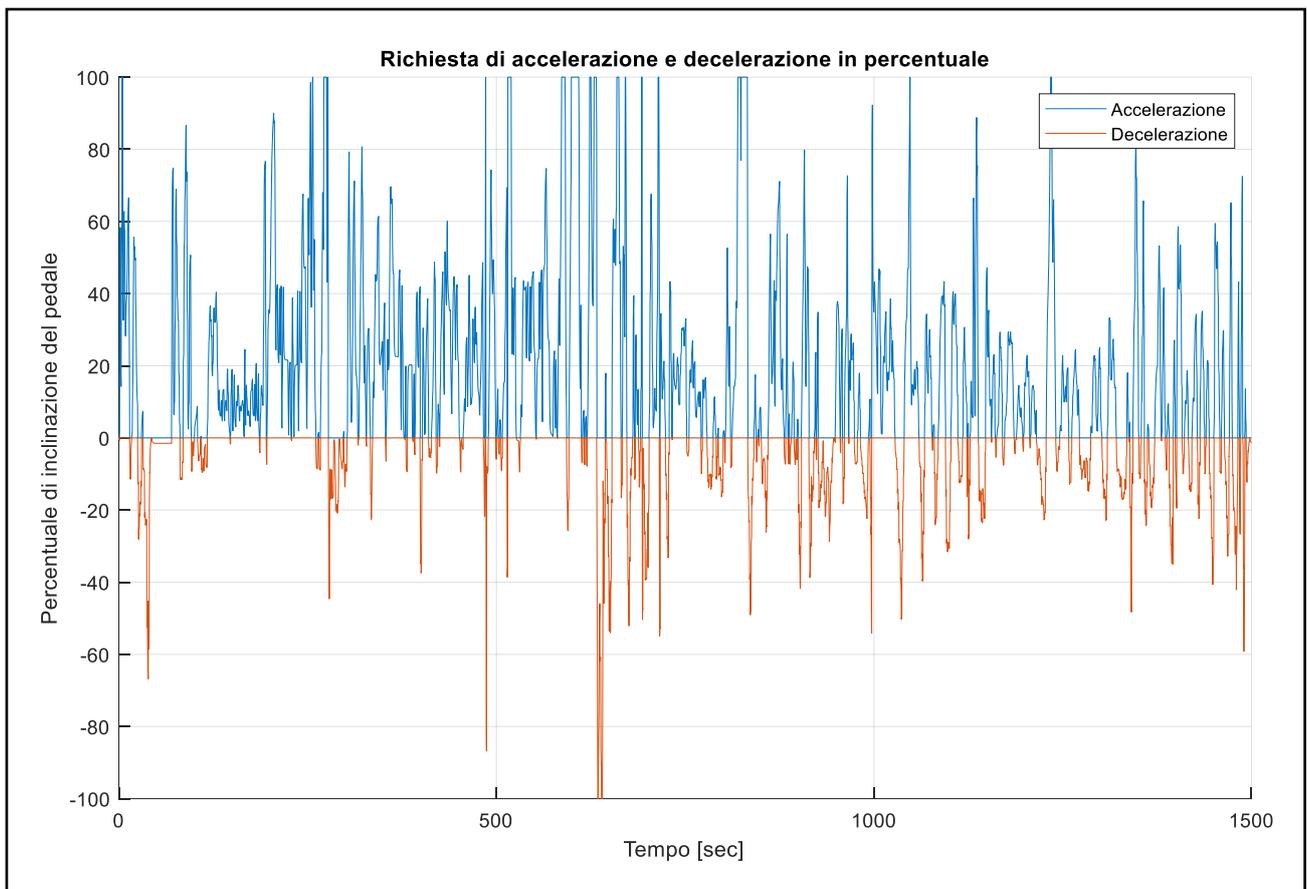


Figura 126 – Richiesta di accelerazione e di frenata

Rispetto al primo caso, questo presenta dei picchi relativi alla decelerazione di modulo inferiore, dovuto all'implementazione della logica dell'e-Pedal, ed all'aumento del coefficiente moltiplicativo della coppia rigenerativa che passa da 0,8 a 1.

8.2.4 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia rigeneratrice

Si riportano in Figura 127 gli andamenti della richiesta di coppia frenante e della massima coppia rigeneratrice che il veicolo riesce ad utilizzare in fase di decelerazione. Anche per questo secondo caso, si osserva che per la maggior parte del tempo, la coppia rigeneratrice riesce a soddisfare la richiesta di coppia frenante. Vi sono però anche in questo caso, degli intervalli di tempo, seppur piccoli, in cui la richiesta di coppia frenante non viene soddisfatta e si dovrà quindi ricorrere alla frenata classica dissipativa, per poter garantire la decelerazione richiesta dal conducente.

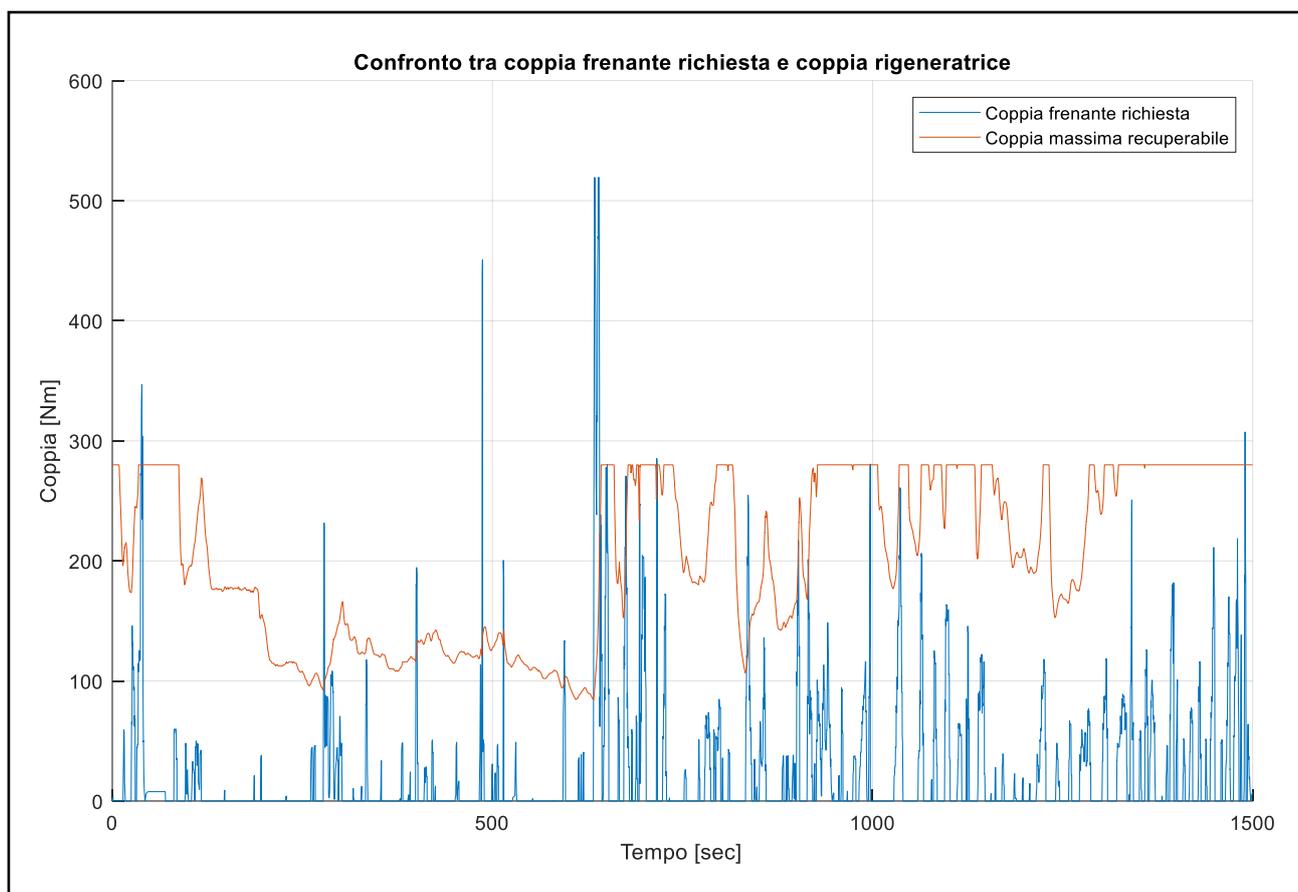


Figura 127 – Confronto tra coppia frenante richiesta e coppia massima rigeneratrice

Dal confronto con il primo caso, si vede chiaramente come gli intervalli di tempo in cui la richiesta di coppia frenante supera in modulo la coppia massima recuperabile, siano inferiori per numero, e per valore in modulo, per cui si può affermare che questa seconda configurazione soddisfa maggiormente le richieste del conducente, ripristinando una quantità maggiore di state of charge, come vedremo nel seguito.

Viene poi mostrato in dettaglio il confronto tra le coppie frenanti nell'intervallo di tempo compreso tra i 600 secondi ed i 750 secondi in Figura 128 (come fatto anche per la prima prova), in cui analizza nel dettaglio il picco di richiesta di coppia frenante, che il veicolo non riesce a soddisfare con la sola frenata rigenerativa. Questi valori di picco si manifestano in corrispondenza della brusca variazione di velocità riportata nel profilo di velocità, a conferma del fatto che il conducente richiede al veicolo una elevata decelerazione, che però potrà essere soddisfatta solo dall'intervento della frenata dissipativa tradizionale.

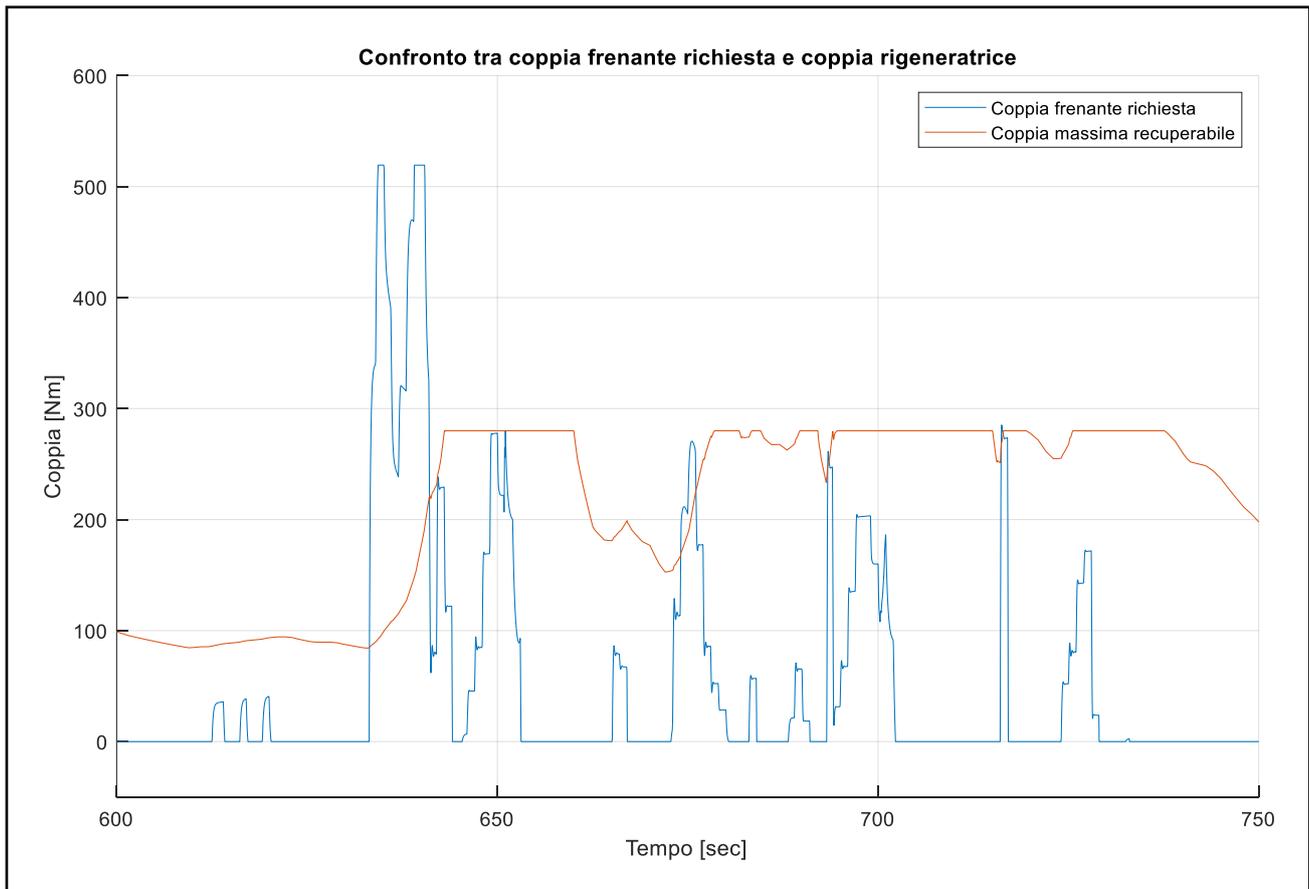


Figura 128 – Dettaglio del confronto tra le coppie frenanti

In aggiunta, grazie ad un confronto effettuato tra questo dettaglio di Figura 128 e di Figura 118 (sempre relativo al dettaglio tra le coppie frenanti), si evince come il secondo caso presenti dei valori di picco minori in modulo rispetto a quelli rilevati nel primo caso. Questo indica un miglioramento della risposta del sistema dovuta all'implementazione della logica del sistema e-Pedal.

8.3.5 – Coefficiente di rigenerazione

Viene ora analizzato il coefficiente globale di rigenerazione, il cui andamento viene riportato in Figura 129. Il suo profilo è profondamente diverso dal profilo rilevato per il primo caso, dato che in questa nuova configurazione, ovvero con l'aggiunta di due condizioni per la gestione della frenata rigenerativa, si raggiunge raramente il valore unitario, e lo si mantiene tale per un periodo di tempo molto limitato. Tuttavia, dato che durante le fasi di decelerazione il modulo di tale coefficiente aumenta quasi istantaneamente, la frenata rigenerativa assume comunque un ruolo chiave per il calcolo dell'autonomia del veicolo, riuscendo a sfruttare buona parte della decelerazione, per convertirla in energia elettrica.

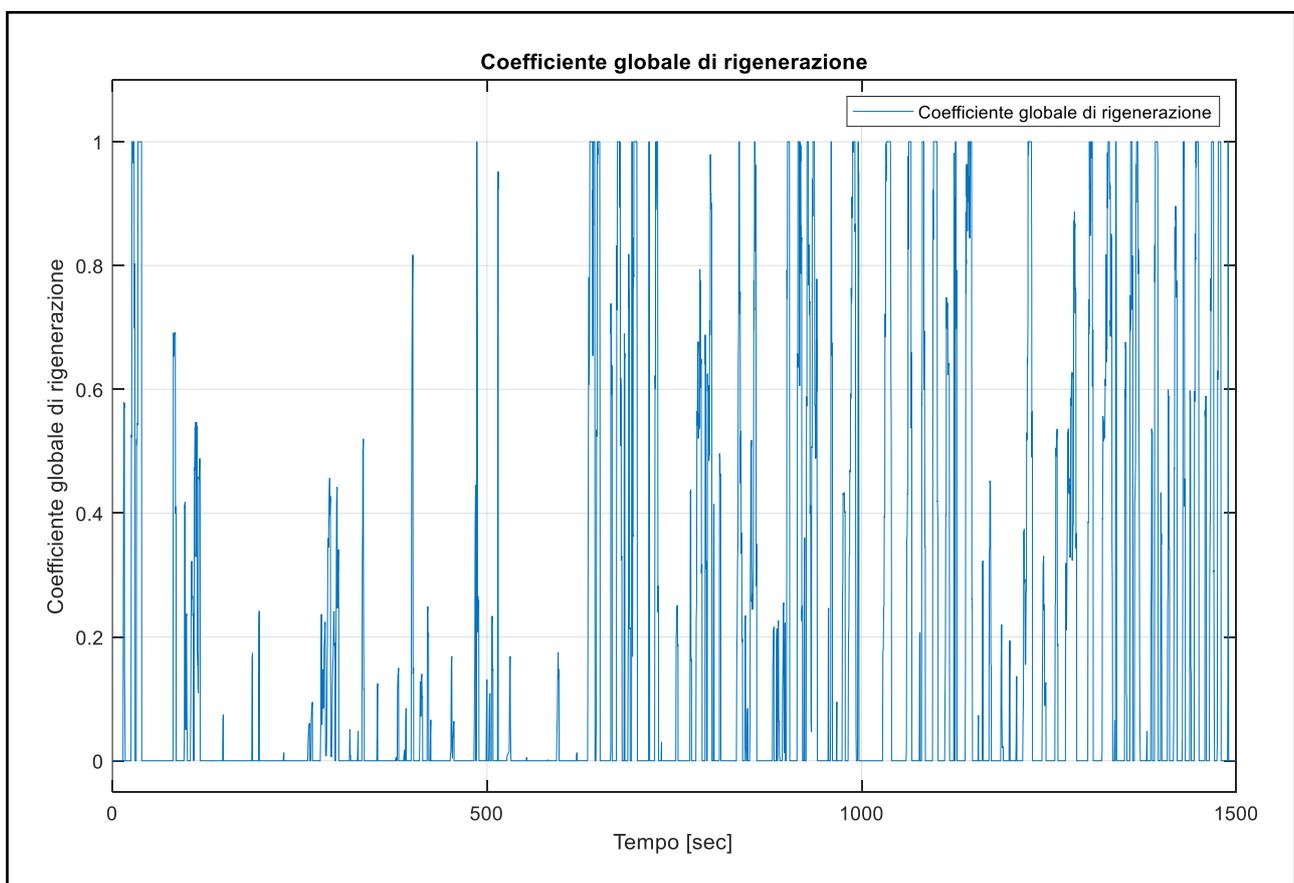


Figura 129 – Coefficiente globale di rigenerazione

8.3.6 – Coppia rigeneratrice

Di seguito in Figura 130, vengono riportati gli andamenti relativi alle curve che descrivono la coppia massima rigeneratrice (curva blu), e la coppia rigeneratrice che effettivamente può essere esercitata dal veicolo (curva rossa), data dal prodotto tra la prima, ed il coefficiente globale di rigenerazione.

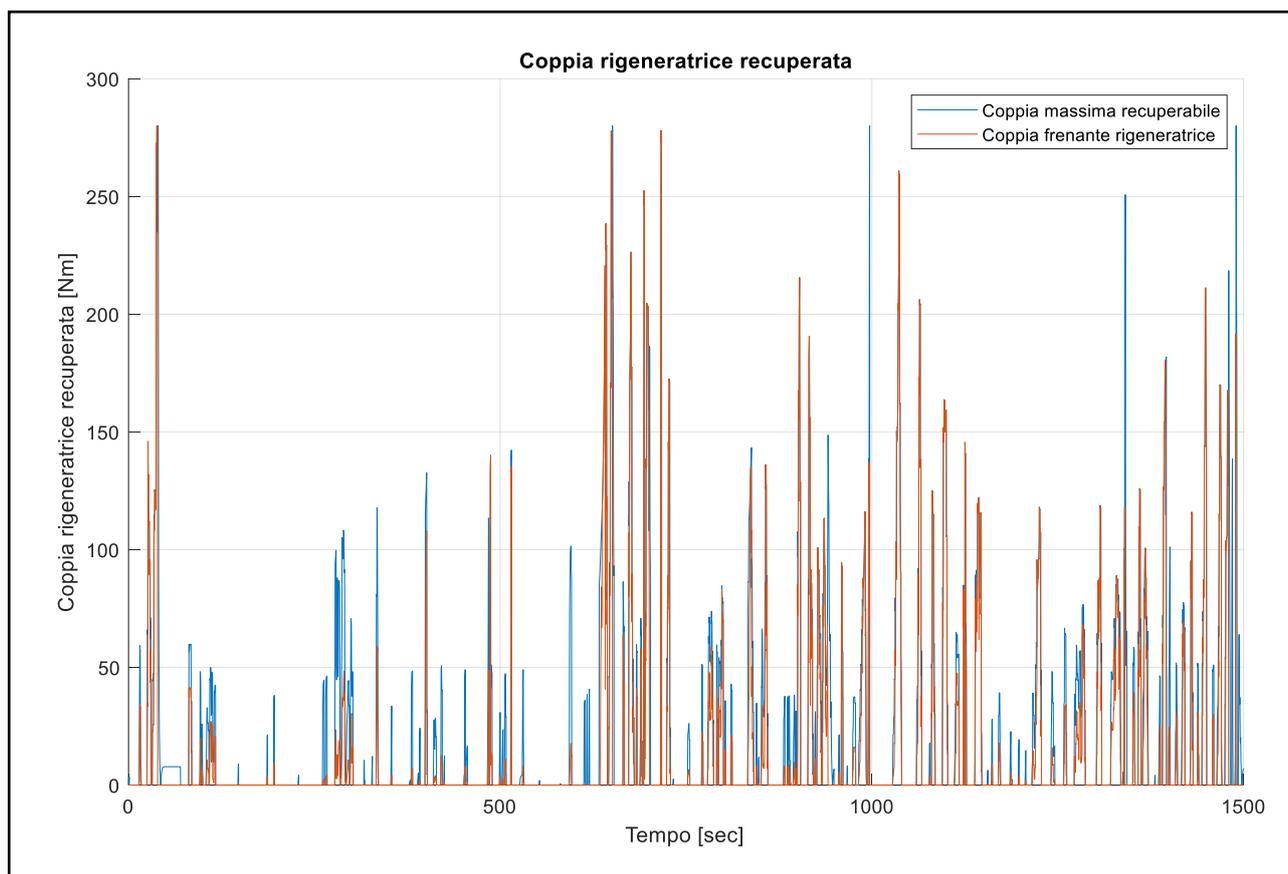


Figura 130 – Coppia effettiva rigenerata

Rispetto al primo caso, si nota solo una lieve diminuzione dei picchi di coppia rigeneratrice, in prossimità della fine del percorso, mentre rimangono sostanzialmente inalterati per il resto del tracciato.

Per avere una migliore comprensione dell'andamento della coppia effettiva esercitata per la rigenerazione, in Figura 131 viene mostrato nel dettaglio l'intervallo di tempo compreso tra i 600 secondi ed i 750 secondi, in cui viene mostrato l'effetto che il coefficiente moltiplicativo pari a 1 comporta sull'intensità della coppia frenante rigeneratrice effettivamente esercitata dal veicolo.

Infatti, si nota come le due curve siano per gran parte del tempo sovrapposte, ovvero che tutta la coppia che può essere ripristinata in fase di decelerazione viene effettivamente convertita in energia elettrica che alimenta la batteria della vettura.

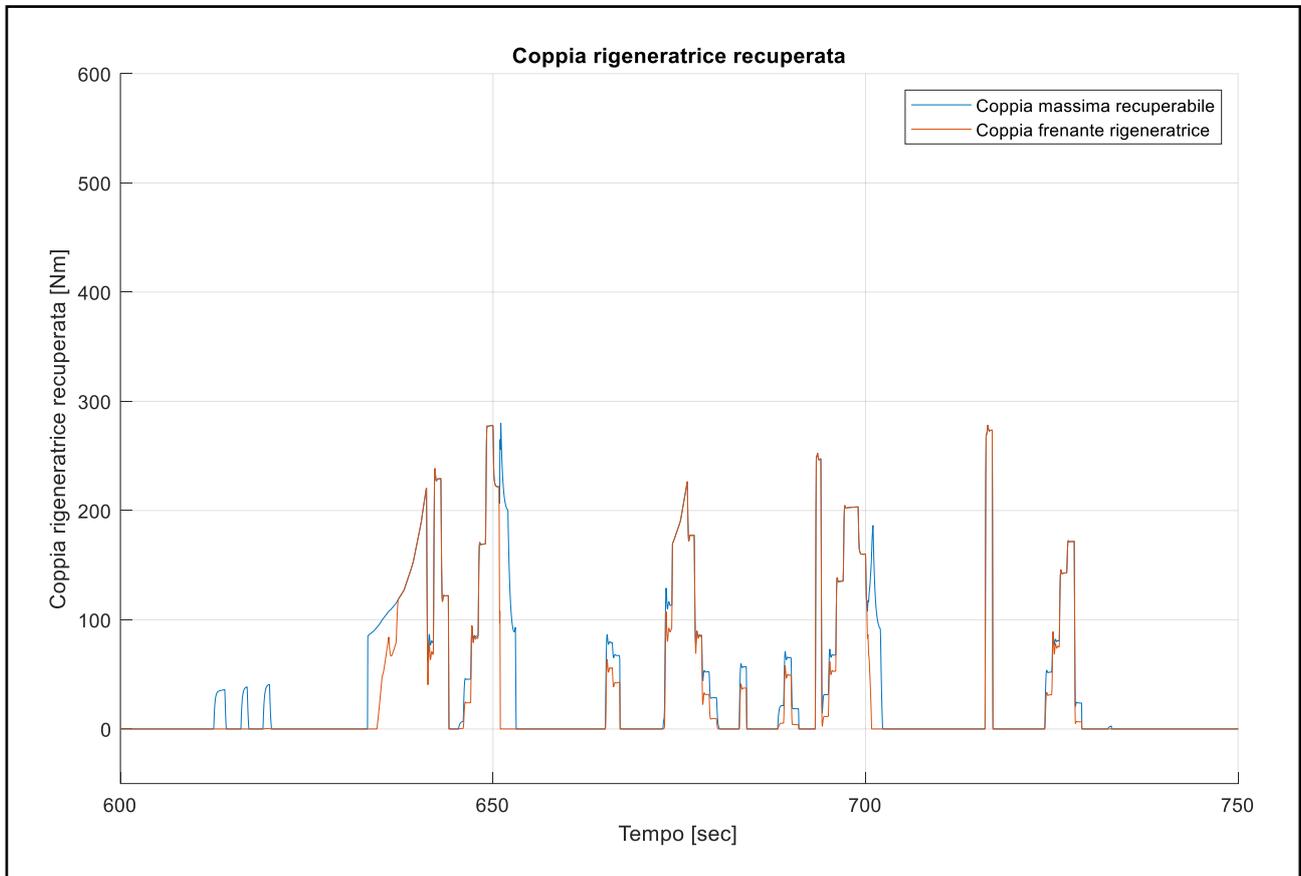


Figura 131 – Dettaglio del confronto tra la coppia massima rigeneratrice e quella effettiva

8.3.7 – Coppia dissipativa

Viene infine mostrato l'andamento della coppia dissipativa in Figura 132, relativa al freno tradizionale, che viene utilizzato nel momento in cui la sola coppia frenante rigeneratrice non è in grado di soddisfare tutta la richiesta di coppia frenante.

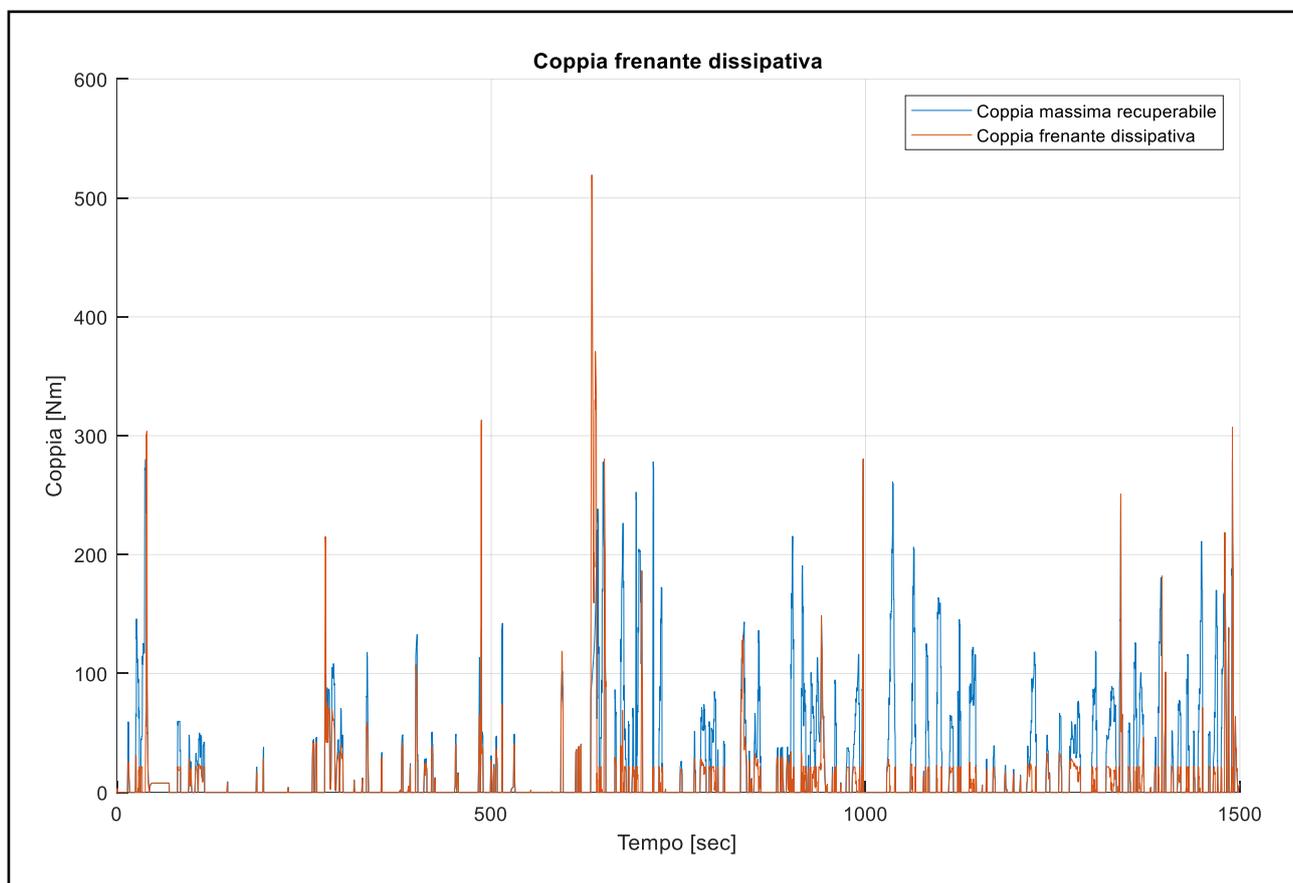


Figura 132 – Andamento della coppia frenante dissipativa

Rispetto al primo caso, in questa nuova configurazione la coppia dissipativa che viene richiesta è nettamente inferiore, specie nell'ultimo tratto del percorso, in cui si hanno solo pochi picchi di coppia frenante dissipativa, mentre nel primo caso i picchi di coppia dissipativa erano circa il doppio, ed i loro moduli erano anche maggiori di quelli riportati nella seconda configurazione (sempre con riferimento all'ultimo tratto del percorso).

Viene anche in questo caso riportato in dettaglio cosa accade per l'intervallo di tempo compreso tra i 600 secondi ed i 750 secondi, in cui si ha il picco di richiesta di coppia frenante da parte del conducente, e deve entrare in azione la coppia dissipativa per garantire una decelerazione coerente con quella richiesta. In Figura 133 viene quindi mostrato quanto appena detto, e si nota come la coppia frenante dissipativa entri in gioco nello stesso instante

di tempo della coppia rigeneratrice, al fine di generare una coppia totale frenante pari a quella richiesta.

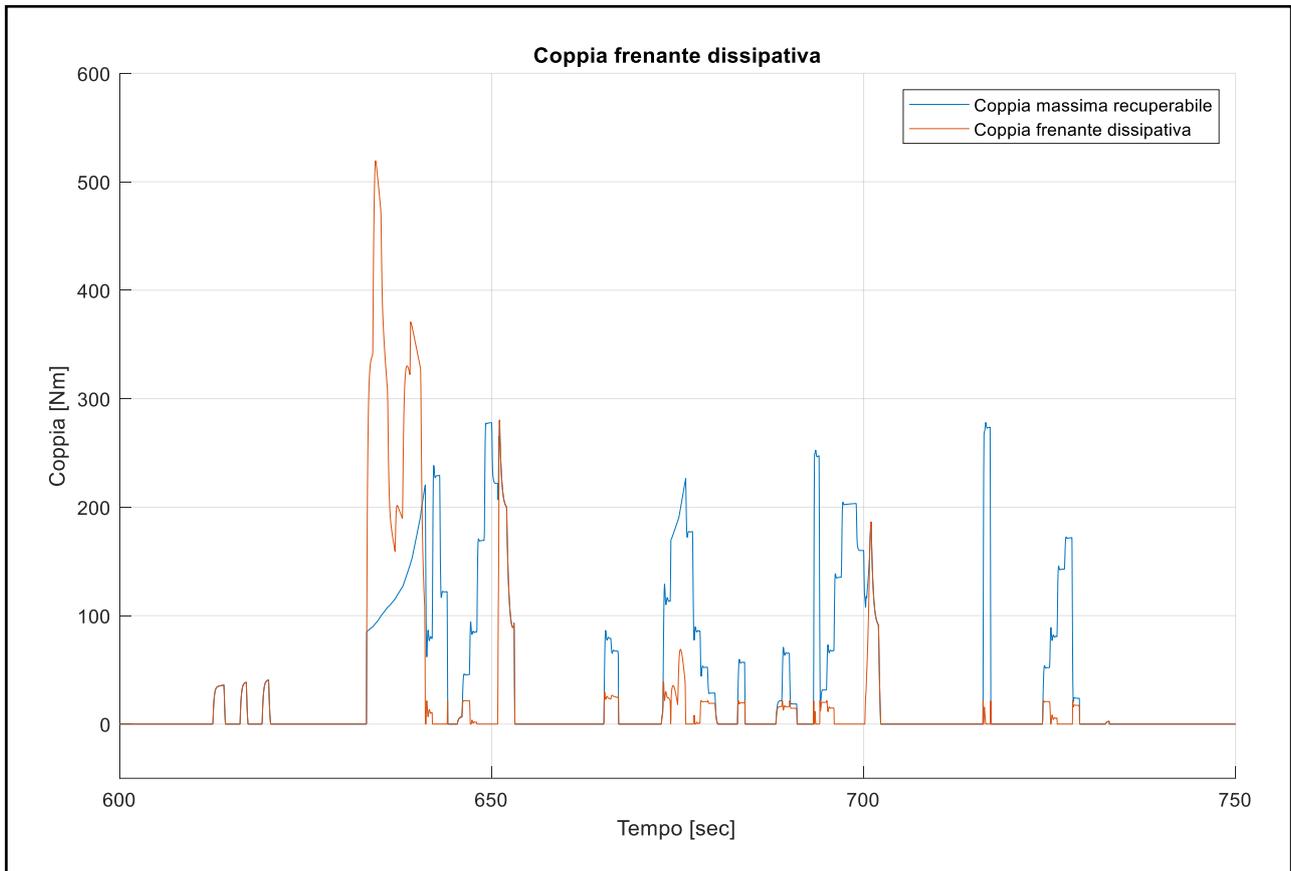


Figura 133 – Dettaglio del confronto tra la coppia massima rigeneratrice e quella dissipativa

Anche in questo caso, rispetto a quello del primo caso, si nota una netta diminuzione della coppia frenante dissipativa, sia in termini di modulo, sia in termini di durata temporale, confermando il miglioramento apportato dall'introduzione della logica legata all'e-Pedal.

8.3.8 – State of charge

Come ultimo parametro analizzato, viene mostrato lo state of charge in Figura 134, valutato per tutta la durata del percorso. Come anticipato nell'introduzione, il suo valore iniziale viene fissato al 80%, per garantire la massima efficienza in fase di frenata, e dopo aver viaggiato per 25 minuti, pari alla durata totale del viaggio, si riscontra una diminuzione dello state of charge del 7,44%, portandolo di fatto ad un livello pari al 22,56%.

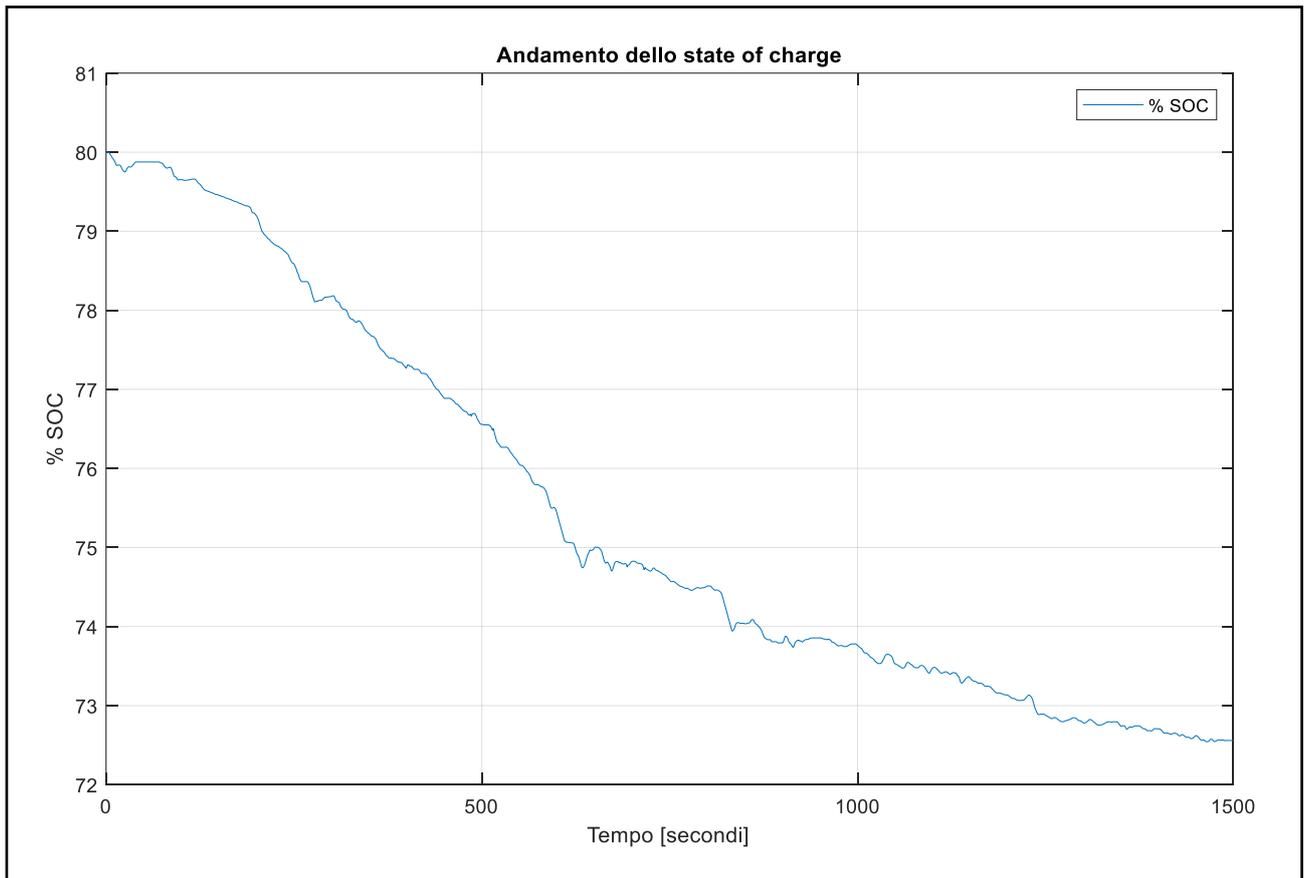


Figura 134 – State of charge valutato per tutto il percorso

8.4 – Conclusioni relative al percorso reale

Dal confronto tra queste due simulazioni relative ad un caso reale, si evince come la logica dell'e-Pedal porti dei vantaggi legati all'autonomia del veicolo, seppur minimi, rispetto alla logica tradizionale relativa alla frenata rigenerativa, implementata sui modelli classici di veicolo elettrico. Nello specifico, è stata verificata una diminuzione della coppia frenante dissipativa, fonte di perdite, dovuta all'ottimizzazione della logica legata alla frenata rigenerativa, che ha consentito di incrementare l'energia recuperabile durante la fase di decelerazione.

Queste prove sono state inoltre condotte lungo un percorso extraurbano (per la maggior parte del tempo), per il quale il sistema e-Pedal non garantisce le sue migliori prestazioni. Si auspica quindi un notevole margine di miglioramento per lo state of charge, nel caso in cui il percorso dovesse essere puramente urbano, per il quale è stato progettato questo nuovo sistema di guida.

9 – Conclusioni

La prima fase della tesi, riguardante la realizzazione del modello del veicolo elettrico in ambiente Matlab, si è conclusa con successo, riuscendo ad adattare alle nostre esigenze un modello già esistente e presente sul sito della MathWorks®.

In fase di validazione, è stato dimostrato che il modello sviluppato in ambiente Simulink è attendibile, e può essere adottato come modello di partenza per stimare le autonomie dei veicoli elettrici, in funzione dei parametri caratteristici di ogni vettura. Nello specifico, la logica implementata nel modello originario mirava già alla massima rigenerazione in fase di decelerazione, per cui a seguito della validazione del modello, sono stati inseriti dei coefficienti moltiplicativi per rendere il modello quanto più simile ad una vettura reale, andando a diminuire di fatto la massima autonomia della vettura.

La fase di implementazione della logica dell'e-Pedal, seppur creata con l'obiettivo di sfruttare appieno tutto il potenziale della frenata rigenerativa per ripristinare lo state of charge, contiene ulteriori condizioni al suo interno, che di fatto limitano il modulo della coppia frenante rigeneratrice. Questo limite viene però compensato dalle altre modifiche introdotte con la nuova logica dell'e-Pedal, riportando di fatto l'autonomia totale, ad un valore simile a quello rilevato mediante la simulazione con il modello originale, relativo ad un veicolo elettrico tradizionale.

Nell'ultima fase relativa alle simulazioni, è stato confermato che la differenza tra l'autonomia dei veicoli elettrici tradizionali, rispetto a quella dei veicoli elettrici con la logica del sistema e-Pedal implementata, è minima. Pertanto, l'implementazione di questo nuovo sistema di guida, non incrementa in maniera significativa l'autonomia dei veicoli elettrici, seppur adottando una logica che massimizza la frenata rigenerativa.

9.1 – Ulteriori considerazioni

Vengono nel seguito esposte alcune tematiche che hanno giocato un ruolo chiave durante l'esecuzione delle simulazioni, e che hanno contribuito alla determinazione dell'autonomia globale dei veicoli elettrici simulati tramite il modello, sia per quanto riguarda i veicoli elettrici tradizionali, sia quelli con la logica dell'e-Pedal implementata.

9.1.1 – Tipologia di percorso adottato

Il ciclo WLTP adottato per la simulazione non comprende di fatto tutte le possibili situazioni che normalmente si verificano durante un tragitto, come ad esempio un attraversamento pedonale, oppure la presenza di semafori, rotonde, incroci e così via, ma viene semplicemente definito un percorso da seguire in un arco temporale di 30 minuti, e che abbia una distanza prefissata, pari a 23.25 km. Questo implica che i risultati estratti alle simulazioni, non rispecchiano quella che sarà la realtà dei fatti, per i motivi appena citati, rendendo comunque necessaria una prova su strada. Se ad esempio si analizza la prova effettuata nel caso reale, viene effettuata lungo un percorso prevalentemente extraurbano, in cui la logica dell'e-Pedal non esprime tutto il suo potenziale, al contrario di come farebbe per un percorso puramente urbano.

9.1.2 – Limitatore della coppia rigeneratrice

Il coefficiente moltiplicativo della coppia rigeneratrice, inizialmente avente valore unitario durante la fase di validazione del modello, è stato successivamente decrementato fino ad un valore pari a 0,8 per tenere conto di tutte le perdite verificatesi durante la prova su strada. In questo modo, la coppia massima rigenerabile attraverso la frenata rigenerativa è stata limitata, riducendo di conseguenza l'autonomia del veicolo stesso. Infatti, dopo aver eseguito delle simulazioni con e senza il sistema di rigenerazione, è stata riscontrata una diminuzione dell'autonomia di 79 km, su un percorso totale di 392,45 km. Da questo confronto, è stato appurato che il coefficiente moltiplicativo pari a 0,8 era in realtà troppo ottimistico, e si auspica pertanto un'analisi approfondita relativa a tale coefficiente, in maniera tale da poter avere un valore che meglio rispecchi la realtà, con un valore inferiore rispetto a quello ipotizzato inizialmente, pari a 0,8, che non si è rivelato adatto al modello preso in esame.

9.1.3 – Sensazione di guida

Un altro aspetto da tenere sotto osservazione riguarda l'esperienza di guida del conducente. Infatti, a seguito dell'implementazione della logica dell'e-Pedal, la vettura assumerà un comportamento diverso e maggiormente dinamico in fase di decelerazione, frenando con maggior intensità rispetto ad un veicolo classico. A tal proposito è opportuno eseguire delle prove su strada, in modo da testare effettivamente il comportamento della vettura, capendo come essa risponda ai comandi e qual è la percezione di guida del conducente, sia essa confortevole o meno.

9.1.4 – Inquinamento atmosferico

Grazie alla tecnologia dell'e-Pedal, buona parte della decelerazione che il conducente richiederà, sarà affidata esclusivamente al sistema di frenata rigenerativo, il quale non richiede l'utilizzo di freni a disco o pastiglie. Questo fenomeno comporta quindi la riduzione del particolato che si verrebbe altresì a creare per attrito in un normale sistema frenante dissipativo, riducendo quindi le emissioni di sostanza inquinanti (seppur in piccolissima parte).