



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2020/2021

Sessione di Laurea di Dicembre 2021

Ottimizzazione tramite algoritmi 'Particle Swarm Optimization' della strategia di controllo per un veicolo ibrido 'heavy-duty' a 'fuel cells'.

Relatori:

prof. Misul Daniela Anna
prof. Belingardi Giovanni

Corelatori:

dr. Ing. Anselma Pier Giuseppe
ing. Spano Matteo

Candidato:

Capello Marco

Abstract

Nel presente lavoro di tesi si è realizzato un modello di un veicolo *Fuel-Cell hybrid electric vehicle* (FCHEV) di tipologia *heavy-duty* in ambiente Matlab-Simulink. Si è inoltre provveduto a vagliare la letteratura scientifica esistente in merito alle strategie di controllo applicabili in condizioni *real-time* in una reale *Electronic Control Unit* (ECU). Si è così individuata ed implementata una strategia di controllo di tipo *rule-based* che basa il proprio funzionamento su una mappa bidimensionale in funzione della potenza richiesta al veicolo e dello *State of Charge* (SOC) della batteria. Si sono dunque individuati dei cicli guida al fine di effettuare delle simulazioni con il modello così realizzato, alcuni dei quali sono stati ricavati utilizzando il *software* VECTO. Si è poi impiegata la *Particle Swarm Optimization* (PSO) al fine di ottimizzare i parametri costituenti della strategia di controllo sulle missioni guida precedentemente ottenute, con l'obiettivo di minimizzare il consumo d'Idrogeno. I risultati così ottenuti sono stati confrontati con i comportamenti della *Dynamic Programming* (DP) sui medesimi cicli guida, ottenendo un consumo d'Idrogeno mediato sui cicli guida superiore dell'5.25% rispetto a quanto ricavato mediante DP.

Sommario

1. Introduzione	1
1.1 - <i>Generalità sulle Fuel-Cells</i>	1
1.2 - <i>Finalità del presente lavoro di tesi</i>	3
1.3 - <i>Ricerca bibliografica relativa alle strategie di controllo</i>	4
2. Realizzazione del modello di veicolo	13
2.1 - <i>Realizzazione del modello Simulink</i>	13
2.2 - <i>Implementazione della strategia di controllo</i>	18
2.3 - <i>Analisi delle discrepanze Matlab-Simulink</i>	21
2.4 - <i>Cicli guida utilizzati per le simulazioni</i>	30
2.5 - <i>Ottimizzazione della strategia di controllo mediante la Particle Swarm Optimization</i>	38
3. Risultati delle simulazioni	46
3.1 - <i>Risultati su ciclo CARB-Heavyduty</i>	46
3.2 - <i>Risultati su ciclo Urban+LongHawl+Urban</i>	49
3.3 - <i>Risultati su ciclo Regional+Urban</i>	53
3.4 - <i>Confronto con i risultati della DP</i>	56
4 - Conclusioni	69
Lista dei simboli	70
Bibliografia	73
Sitografia	74

1. Introduzione

Negli ultimi decenni le problematiche legate alle emissioni di inquinanti da parte delle attività umane e le loro molteplici conseguenze sono state oggetto di attenzione crescente sia da parte della società civile che da parte delle principali istituzioni politiche e governative mondiali. In tal senso il settore dei trasporti su strada, contribuendo in maniera significativa alle emissioni di inquinanti, ha visto dapprima l'istituzione di limiti normativi per le emissioni di inquinanti, di procedure di prova per la loro misurazione e successivamente un progressivo inasprimento di tali limiti e una riforma di dette procedure di rilevazione. Tendenze simili sono anche ad oggi previste per il futuro. Si pensi ad esempio che per l'attuale limite relativo alla CO₂ oltre il quale i costruttori debbono pagare una sanzione come media di flotta pari a 95gCO₂/km è prevista una riduzione, nel caso di veicoli passeggeri, del 37.5% nel 2030. Tutto ciò ha evidentemente un importante impatto sui produttori di veicoli e ha assai stimolato la ricerca e lo sviluppo da un lato di tecnologie per l'efficientamento del tradizionale motore a combustione interna (*ICE – Internal Combustion Engine*) e dall'altro lo studio e l'implementazione di soluzioni alternative all'ICE convenzionale. In questo senso si può affermare che, dal punto di vista della tipologia di veicoli stradali, ci si sta avviando verso uno scenario eclettico. Infatti, oltre a soluzioni che prevedono l'implementazione di moderne tecnologie atte a migliorare le prestazioni del motore a combustione interna, il mercato sarà caratterizzato dalla presenza di veicoli puramente elettrici, con *powertrains* ibridi o anche dotati di motori a combustione interna funzionanti con combustibili alternativi, come ad esempio l'Idrogeno. Se da un lato recenti analisi prevedono al 2050 ancora una massiccia presenza del motore a combustione interna nelle vetture vendute, dall'altro la sezione di mercato dei veicoli puramente elettrici è destinata ad assumere un'importanza sempre crescente nei prossimi decenni. Proprio in questa categoria si collocano i veicoli utilizzando le *fuel-cells (FCs)* del tipo FCEV (*Fuel-Cell Electric Vehicle*). Tali FCs sono ad oggi assai considerate nell'ambito della ricerca in quanto sono caratterizzate da valori di efficienza ben superiori a quelli degli ICEs convenzionali e nella generazione di potenza elettrica non emettono inquinanti. Sebbene attualmente i costi di produzione per le FCs siano ingenti esse non sono dotate di organi in movimento e sono caratterizzate da una relativa semplicità costruttiva che potrebbe garantirne, con lo sviluppo della tecnologia e della conoscenza in questo ambito, una futura produzione di massa con costi non enormi e una buona vita utile risultante. Allo stato attuale però, pur garantendo un buon livello di autonomia ai veicoli nei quali sono installate, le FCs risentono del costo dell'Idrogeno in esse impiegato come combustibile ed inoltre si costituiscono come una tecnologia non pienamente sviluppata ed ancora in evoluzione.

1.1 - Generalità sulle Fuel-Cells

Le *Fuel-Cells* sono dei dispositivi di conversione elettrochimica in cui l'energia chimica posseduta dal combustibile è convertita direttamente in corrente elettrica. Ciascuna cella è sostanzialmente costituita da due elettrodi alimentati con dei reagenti, una sostanza elettrolita ed un circuito elettrico collegato agli elettrodi. Una *fuel-cell stack* è costituita da un certo numero di celle connesse in serie, eventualmente distribuite su più rami in parallelo. Le *Fuel-Cells* possono essere classificate in base alla sostanza elettrolita utilizzata, in tal senso si hanno:

- *Alkaline FCs (AFCs)*, in cui è utilizzata come elettrolita una soluzione acquosa di idrossidi di metalli alcalini inserita in una matrice;
- *Proton Exchange Membrane FCs (PEMFCs)*, in cui si usa come elettrolita un sottile strato solido di polimero organico, in cui sono disperse particelle metalliche catalizzanti (Pt in particolare). Questa tipologia di FC è certamente la maggiormente considerata nell'ambito *automotive*;
- *Phosphoric Acid FCs (PAFCs)*, in cui l'elettrolita è acido fosforico contenuto in una matrice di carburo di Silicio, con elettrodi catalizzati al Platino;
- *Molten Carbonate FCs (MCFCs)*, in cui si utilizza come elettrolita una combinazione di carbonati di metalli alcalini in una matrice di LiAlO_2 ;
- *Solid Oxide FCs (SOFCs)*, in cui è impiegato come elettrolita un ossido metallico non poroso.

Esistono anche delle *Direct Methanol FCs (DMFCs)* che però si configurano come delle *PEMFCs* in cui il combustibile è Metanolo e non Idrogeno. Si riportano in tabella 1.1.1 alcuni interessanti parametri operativi di dette tipologie di FCs.

Tabella 1.1.1. Parametri caratteristici delle diverse tipologie di FCs – Fonte [14].

Tipologia di Fuel Cell	Temperatura d'esercizio [°C]	Efficienza Elettrica [%]
AFC	60-100	45-60
PEMFC	60-120	40-60
PAFC	180-200	35-40
MCFC	600-700	45-60
SOFC	800-1000	50-65
DMFC	60-130	40

Il veicolo esaminato nel presente lavoro di tesi impiega una FC del tipo PEMFC. Tale tipologia di FC utilizza elettrodi porosi in materiale carbonioso dotati, all'interfaccia con la membrana polimerica, di uno strato catalizzante costituito da particelle di Platino su un supporto di Carbonio. L'elettrodo negativo (anodo) è alimentato con Idrogeno, che si divide in ioni ed elettroni secondo l'equazione 1.1.1.



L'elettrodo positivo (catodo) è alimentato con Ossigeno e qui avviene la reazione tra gli elettroni migrati attraverso il circuito elettrico e gli ioni migrati attraverso la membrana, secondo l'equazione 1.1.2.



In questo modo viene prodotta energia elettrica, dell'Acqua che è espulsa dalla cella insieme all'eccesso di Ossigeno e del calore dato dall'esotermia delle reazioni.

Tra i vantaggi principali delle PEMFCs si possono elencare:

- Temperatura operativa relativamente bassa, che consente anche un veloce avviamento della FC;
- Buon livello di efficienza elettrica;
- Buona densità di potenza.

Va però ricordato che, al fine di evitare una disidratazione della membrana e quindi un malfunzionamento della FC, è necessaria una umidificazione dei reagenti. Inoltre l'Idrogeno impiegato deve essere puro in quanto le PEMFCs soffrono di avvelenamento da CO anche in concentrazioni di qualche ppm.

1.2 – Finalità del presente lavoro di tesi

Il veicolo considerato in questa sede è rappresentato da un mezzo *heavy-duty* (HD) 4x2 il cui *powertrain* è costituito essenzialmente da un motogeneratore elettrico, una trasmissione tra questo e l'asse motore, un pacco batterie ed una *fuel-cell stack*. Si riporta in figura 1.2.1 un semplice schema di detto *powertrain*.

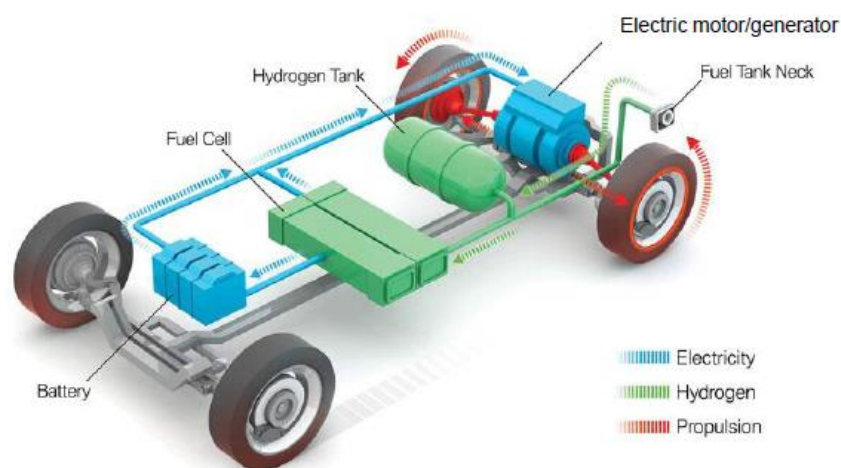


Figura 1.2.1: schema del powertrain del veicolo considerato nel presente lavoro di tesi.

Tale veicolo è caratterizzato da una massa totale, carico compreso, di 40442kg. Il motogeneratore di trazione garantisce una potenza massima pari a 391kW ed una coppia massima di 2933Nm, la batteria ha una capacità di 216kWh ed è costituita da 150 celle in serie disposte su 10 rami in parallelo. La *FC stack* ha invece una potenza massima di 267kW ed è costituita da 3 rami in parallelo di 700 celle in serie ciascuno, mentre la trasmissione ha rapporto costante pari a 7.5.

Un veicolo del genere necessita dell'implementazione di una strategia di controllo che determini la modalità di funzionamento della FC e il *power split* con la batteria, al fine di ottenere un consumo di combustibile accettabile ed un determinato livello di autonomia. In questo senso, lo scopo primario del presente lavoro di tesi magistrale è costituito dalla

realizzazione e simulazione di una strategia di controllo applicabile in condizioni *real time* una volta realizzato il veicolo. A tal fine si è realizzato, sulla base di alcuni *scripts* Matlab, un modello in ambiente Simulink del mezzo considerato. Inoltre si è vagliata la letteratura scientifica per individuare una strategia ivi presente da poter utilizzare come base per lo sviluppo della *control strategy* (CS) successivamente implementata nel modello Simulink. Si sono quindi individuati una serie di cicli guida utili per simulare il comportamento del modello di veicolo così realizzato e, con lo svolgimento di numerose simulazioni, si sono ottimizzati i parametri caratteristici della CS utilizzando un algoritmo di ottimizzazione denominato *Particle Swarm Optimization* (PSO). Nei successivi capitoli verranno trattate le analisi sopra citate, a partire dalla ricerca bibliografica iniziale sino alla realizzazione del modello Simulink e ai risultati delle simulazioni svolte sulle varie missioni guida.

1.3 – Ricerca bibliografica relativa alle strategie di controllo

Nell'ambito del *powertrain* dei moderni veicoli, siano essi di tipo tradizionale, elettrici o ibridi, esiste una centralina elettronica nella quale è presente un *Energy Management System* (EMS) il cui funzionamento è basato sulla strategia di controllo. Tale EMS è fondamentale, durante la guida, per determinare istante per istante la modalità operativa del *powertrain* e la ripartizione di potenza tra le differenti sorgenti di potenza che lo compongono. L'EMS è fondamentalmente costituito da un *Supervisory Controller*, che determina la modalità operativa del *powertrain* in base alle condizioni di lavoro dei componenti e da una *Control Strategy* (CS), che stabilisce il valore di potenza richiesto ai singoli componenti di trazione. In generale la CS opera in modo da raggiungere un obiettivo per esempio dato dalla minimizzazione del consumo di combustibile, dalla riduzione delle emissioni di inquinanti o dall'ottenimento da parte del veicolo di determinate *performances*. E' possibile classificare le differenti tipologie di CS come segue:

- ***Global optimization strategies* (GOS);**
- ***Static optimization strategies* (SOS);**
- ***Heuristic control techniques* (HCT).**

Tra le *Global optimization strategies* la più nota è certamente la *Dynamic Programming* (DP). Le strategie afferenti a questa tipologia non hanno la possibilità di essere implementate in una reale *Electrical Control Unit* (ECU) in *real-time* in quanto richiedono la conoscenza a priori dell'intero profilo del ciclo guida e sono costose in termini computazionali. In particolare la DP risolve un dato problema di ottimizzazione a ritroso nel tempo sulla base del *Principio di Bellman*. Tali strategie sono però assai utili in quanto forniscono un risultato che si configura come un *ottimo globale* su un dato ciclo guida e possono quindi essere utilizzate come *benchmark* per valutare la bontà dei risultati forniti da altre strategie utilizzabili in tempo reale. Inoltre possono anche essere impiegate per valutare la presenza di comportamenti privilegiati che possano essere iscritti in una regola implementabile in una CS. Per esempio, in [4] i risultati di una strategia di tipo *rule – based* di cui si tratterà in seguito sono confrontati con la soluzione ottimale data dalla DP oppure in [13] si fa riferimento ad articoli scientifici in cui non soltanto si utilizza la DP come *benchmark* ma si estrapolano da essa dei comportamenti tipici, utili all'ottimizzazione di strategie applicabili *on-line*.

Tra le *Static optimization strategies*, invece, la CS più considerata è l'*Equivalent Consumption Minimization Strategy* (ECMS). In questa tipologia di CS non si minimizza un costo integrale e cioè a livello globale come per la DP ma bensì un costo istantaneo, ottenendo così una soluzione sub-ottimale ma avendo una CS implementabile *on-line*. In particolare nell'ECMS la

funzione di costo è relativa al consumo di combustibile ed è esprimibile attraverso l'equazione 1.3.1.

$$m_{eqv} = m_{FC} + m_{BA} = m_{FC} + \lambda * \frac{P_{BA}}{H_i} \quad (1.3.1)$$

In essa il consumo di combustibile è calcolato come somma di due contributi. Il primo è relativo alla *fuel cell* ed il secondo è riferito al consumo *equivalente* di combustibile dato dalla batteria. Tale consumo è calcolato come prodotto tra un *equivalence factor* λ e la potenza richiesta dalla batteria, a sua volta divisa per il potere calorifico inferiore del combustibile H_i . In questo modo, conoscendo istante per istante le condizioni di funzionamento dei vari componenti del *powertrain*, la richiesta di potenza da parte del *driver*, le variabili di controllo e i loro limiti, è possibile determinare tra un numero finito di combinazioni di dette variabili di controllo la combinazione che minimizza il consumo equivalente di combustibile espresso secondo la 1.3.1. L'*equivalence factor* è un parametro cruciale nell'ECMS ed è fortemente dipendente dal ciclo guida considerato. Tendenzialmente viene ottimizzato *off-line* con varie simulazioni su differenti cicli guida ed è anche possibile effettuarne una differenziazione a seconda che la batteria sia in condizioni di ricarica o di scarica. In [3] ed in [9] una strategia di questo tipo è impiegata su un modello di veicolo con sistema propulsivo essenzialmente costituito da una *fuel-cell stack*, un pacco batterie ed un supercondensatore. La CS qui proposta dimostra un buon comportamento su vari cicli guida e ottiene ottimi risultati in termini di consumo d'Idrogeno. E' però importante ricordare come una CS del tipo ECMS possa essere caratterizzata da un costo computazionale troppo elevato che ne pregiudichi l'implementazione in *real-time* su una ECU nel caso in cui si consideri un numero elevato di variabili di controllo. Inoltre la presenza di un *equivalence factor* non ottimale rispetto alla missione guida reale può inficiare negativamente sulle prestazioni della CS. In questo senso, può essere utile considerare una ECMS di tipo adattivo (A-ECMS), in cui l'*equivalence factor* è calcolato e aggiornato durante il ciclo guida *on-line*. Allo stato attuale della ricerca la soluzione più promettente è costituita da un λ determinato in base alla differenza tra *State Of Charge* (SOC) effettivo ad un dato istante ed un suo valore di riferimento. In [12] è presentata una CS che si configura come una sorta di variazione sul tema della A-ECMS nell'ambito dei veicoli a *fuel cells*. La *Fuel Efficient Strategy* (FES) infatti mira ad ottenere istante per istante il *power-split* che possa minimizzare il consumo d'Idrogeno, utilizzando nella funzione di costo un *weighing factor* λ_0 adattabile in relazione alla differenza tra lo SOC desiderato e lo SOC attuale. In particolare, al fine dell'aggiornamento di detto fattore si effettua una previsione della distribuzione di potenza futura ipotizzando che essa sia equivalente a quella passata su un determinato numero di istanti di campionamento. Il funzionamento della FES è riportato in figura 1.3.1.

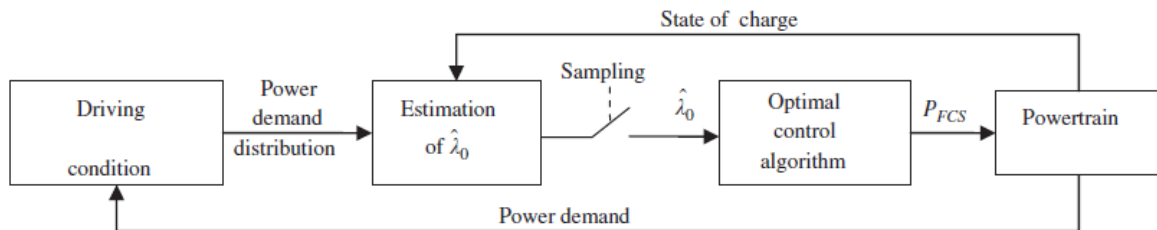


Figura 1.3.1: schema di funzionamento della strategia FES. Fonte [12].

Tale FES è stata testata su alcuni cicli guida e ha comportato consumi di Idrogeno superiori di circa il 4% rispetto al risultato di una *Global Optimization Strategy*.

Le strategie inscrivibili nella categoria delle *Heuristic control techniques* sono anche dette *Rule Based Control Strategies* (RBCS) in quanto la modalità operativa del *powertrain* viene qui determinata sulla base di un *set* di regole empiriche che possono essere definite a priori per

esempio sulla base delle mappe di efficienza dei principali componenti del *powertrain*. Tali CS possono essere facilmente implementabili in *real time* e sono di solito caratterizzate da un costo computazionale non elevato. In questo tipo di CS esistono svariati valori limite in base ai quali si effettua la transizione tra le modalità operative e la relativa calibrazione può richiedere tempi assai lunghi. Inoltre tale calibrazione è chiaramente dipendente dal *powertrain* e dai cicli guida considerati. Ciò potrebbe determinare, in missioni guida reali, situazioni in cui la CS sia caratterizzata da prestazioni lontane dal raggiungimento dell'ottimo globale. Come precedentemente citato, un'interessante tecnica per l'estrapolazione del *set* di regole empiriche che definiscono la CS è l'analisi del comportamento *off-line* della DP. Vagliandone i risultati sui cicli guida considerati potrebbe infatti essere possibile individuare dei comportamenti comuni che possano essere iscritti in una regola da implementare nella RBCS. Come è evidente, però, la DP richiede la conoscenza a priori del ciclo guida e spesso i suoi comportamenti sono strettamente legati a tale fatto. Ciò può quindi pregiudicarne la possibilità di ottenimento di regole empiriche.

Nell'ambito delle *Heuristic control techniques* le regole possono assumere le forme più svariate. Infatti si hanno CS in cui tali regole sono implementate sotto forma di una mappa multidimensionale in funzione di alcuni parametri caratteristici, un semplice elenco di regole euristiche, un *set* di equazioni che determinano i valori soglia per la transizione tra gli stati in funzione di determinati parametri, oppure ancora sotto forma di un *fuzzy-set*. Per esempio, in [4] si considera una strategia RBCS del tipo *map-based* nel caso di un veicolo FCEV impiegante oltre alla *fuel-cell* e al *battery-pack* anche un supercondensatore. Le regole che ne determinano il funzionamento sono cioè date da una mappa bidimensionale in funzione dello *State of Energy* (SOE) del *powertrain* e della potenza richiesta al veicolo, come visibile in figura 1.3.2.

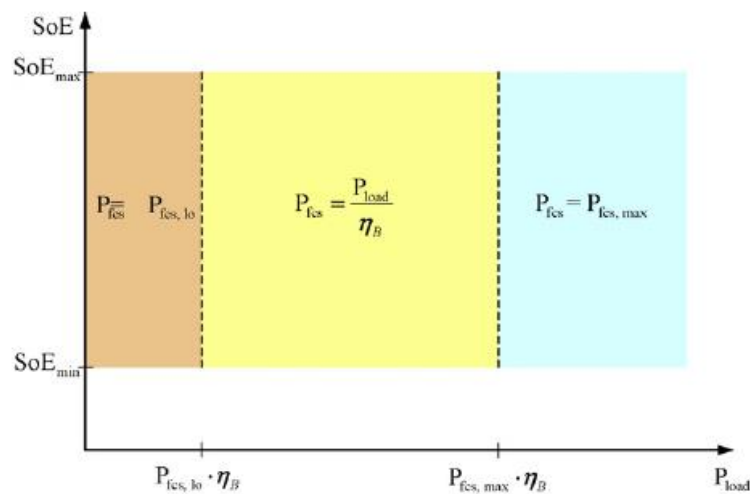


Figura 1.3.2: Mappa di funzionamento di una strategia *map-based*. Fonte [4].

Non ci si dilunga qui molto su tale strategia in quanto essa verrà più ampiamente trattata nel capitolo ad essa dedicato. E' però importante ricordare come in tale articolo scientifico vengano proposte due versioni della CS *map-based* ed il comportamento della medesima su quattro differenti cicli guida determini un consumo di Idrogeno mai superiore del 10% rispetto al caso ottimale dato da una *Global optimization strategy*. Molto diverso è il caso delle regole afferenti alla tipologia *fuzzy-logic*. Infatti, se nella RBCS sopra citata ciascuno stato secondo la logica booleana è attivo o non attivo, nella logica *fuzzy* ciascuno stato è caratterizzato da differenti classi (es. livello alto, livello medio, livello basso) che sono definite da delle proprie funzioni di appartenenza (o *membership functions*). Ognuna di queste classi ha una propria percentuale di attivazione in funzione di determinati parametri che caratterizzano istantaneamente il sistema (es. SOC). Ad esempio in [10] si considera una RCBS basata sulla *fuzzy-logic* per un veicolo

a *fuel-cells* in cui le funzioni di appartenenza del SOC e della potenza richiesta al veicolo hanno la forma riportata nelle figure 1.3.3 e 1.3.4. In particolare il *fuzzy-controller* qui presentato opera come segue: in funzione del SOC e della potenza richiesta al veicolo si calcolano le percentuali di attivazione delle classi di appartenenza per i due stati, interpolando sulle *membership functions* sotto presentate. Così è possibile, utilizzando una tabella delle regole bidimensionale, calcolare le percentuali di attivazione delle classi del parametro di uscita e cioè la potenza richiesta alla *fuel-cell*, il cui valore discreto è ricavato istante per istante a seguito della *defuzzyficazione*. Non si entra qui eccessivamente nel dettaglio ma è utile ricordare che la metodologia forse più semplice per procedere a tale operazione è il calcolo del baricentro dell'area sottesa dalle funzioni di appartenenza, tagliate al livello della percentuale di attivazione di ciascuna classe.

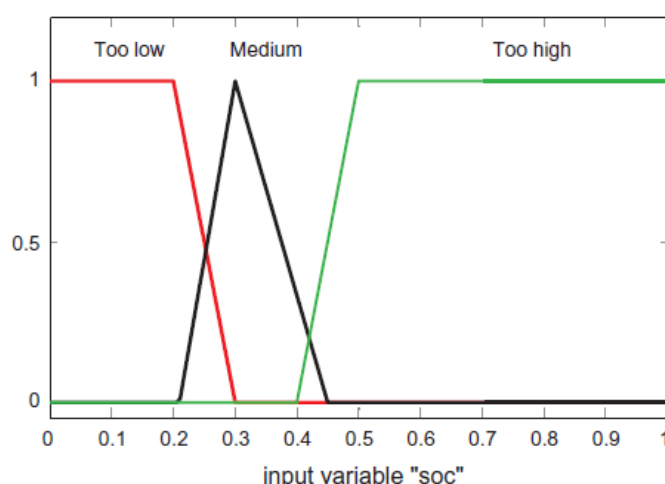


Figura 1.3.3: Funzioni di appartenenza delle classi del SOC. Fonte [10].

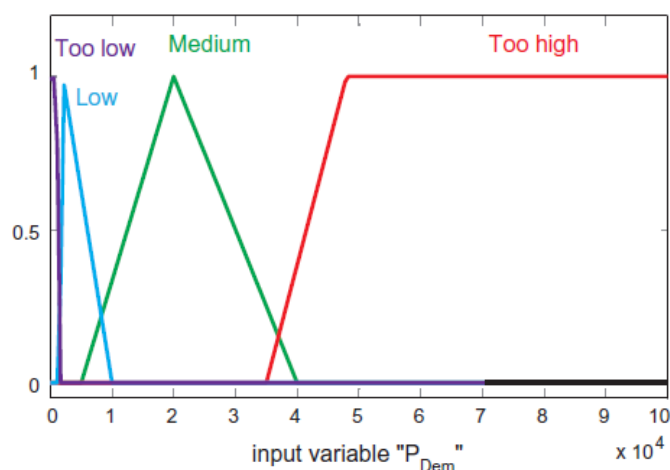


Figura 1.3.4: Funzioni di appartenenza delle classi della potenza richiesta. Fonte [10].

Un ulteriore esempio di RBCS basata sulla *fuzzy-logic*, certamente di maggiore complessità, è rintracciabile in [5]. L'*Energy Management System* (EMS) qui presentato, come visibile in figura 1.3.5, è sostanzialmente costituito da un estimatore dello *State of Health* (SOH) della *fuel-cell*, da uno schedatore dell'*Energy Storage System* (ESS) e da un controllore dell'EMS in cui si applica una logica *fuzzy* basata sul *Model Predictive Control* (MPC). Tale MPC utilizza sostanzialmente un modello per predire degli *outputs* in base alla conoscenza di *inputs* passati e presenti, secondo lo schema riportato in figura 1.3.6. Lo *State of Health Estimator* usa la

tecnica di filtraggio a punti sigma di Kalman per valutare ad ogni istante di campionamento lo stato della resistenza elettrica complessiva della *fuel-cell*, qui utilizzata come parametro discriminante per lo SOH. L' *Energy Storage System Scheduler* (ESSS) ottimizza l'energia stoccata nel pacco batterie e trasmette al controllore dell'*energy management* il valore desiderato di SOC. In particolare si confrontano tre ESSS, sui quali non si ritiene qui opportuno entrare molto nel dettaglio ma, in buona sostanza, sono:

- **Frozen Time Scheduler**, in cui la richiesta di potenza dal guidatore e la tensione al bus elettrico sono considerate circa costanti per punti di campionamento adiacenti;
- **Proportional Scheduler**, in cui si incrementa o decrementa lo SOC proporzionalmente alla differenza tra la potenza di riferimento alla *fuel-cell* e la domanda istantanea di potenza alla medesima;
- **Constant Scheduler**, in cui il valore dello SOC di riferimento è costante nel tempo.

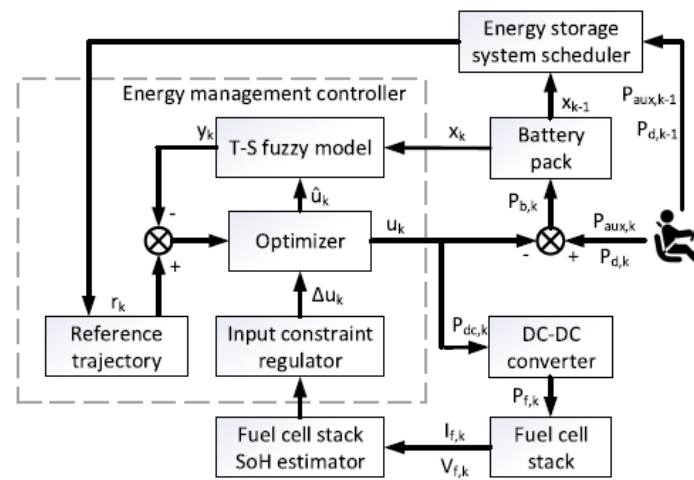


Figura 1.3.5: Schema dell'EMS analizzato in [5]. Fonte [5].

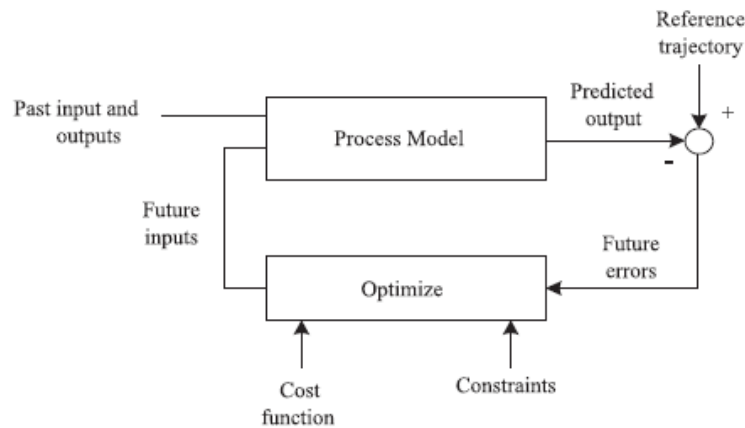


Figura 1.3.6: Schema di funzionamento del MPC. Fonte [2].

Le *performances* della strategia così costituita sono state valutate tramite un modello Matlab su vari cicli guida. Tra gli ESSS si è selezionato come migliore il *Frozen Time Scheduler* sopra citato e la CS ha dimostrato non solo di ottenere buoni risultati in termini di consumo di carburante ma anche di poter essere effettivamente implementabile in *real time*, dato il tempo computazionale non elevato.

In [7] è invece presentata una CS “ibrida” in quanto costituita da due parti:

- **Rule-Based Strategy** (RBS);
- **Adaptive Load Strategy** (ALS) vera e propria, basata sulla variazione di consumo specifico di combustibile dovuta al cambiamento di carico.

In sostanza, la RBS abilita determinate modalità operative in base allo SOC. Esiste però una banda di detto SOC che è libera da regole predeterminate per la definizione del punto operativo della *fuel-cell*. In questa regione opera la ALS in modo da variare il punto di lavoro del sistema a *fuel-cells* al fine di decrementare il consumo d’Idrogeno. Tale valutazione è svolta con l’ausilio di una mappa tridimensionale del tipo presentato in figura 1.3.7, dove P_0 è il valore di potenza base richiesto alla *fuel-cell*, ΔP è la variazione di potenza e Δb_{H_2} è la variazione risultante di consumo specifico d’Idrogeno.

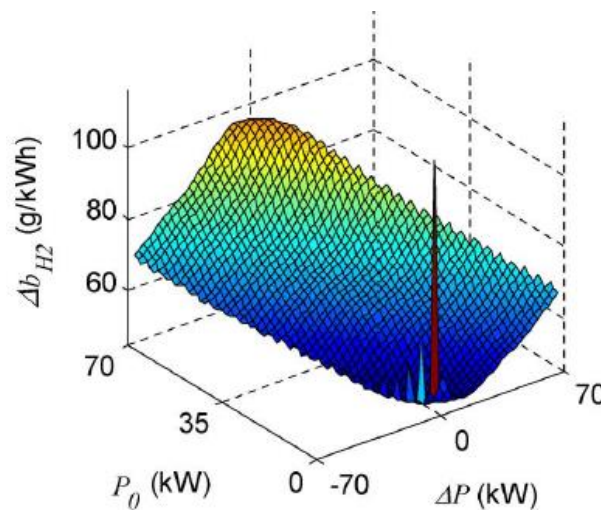


Figura 1.3.7: Mappa tridimensionale relativa alla variazione di consumo specifico d’Idrogeno. Fonte [7].

La strategia, fondamentalmente, determina sulla base del SOC gli *shifting* di potenza dati sia dalla RBS che dalla ALS e stabilisce quindi un valore di potenza desiderato da richiedere al *fuel-cell system*. Una volta vagliati i limiti di potenza della *fuel-cell* ad esempio in termini di transitori si ottiene il valore di potenza effettivo che è utilizzato per il calcolo della reale variazione di consumo specifico d’Idrogeno. Le prestazioni della CS sono state qui confrontate con i risultati di due ulteriori strategie di controllo su vari cicli guida e la ALS si è dimostrata come la migliore in termini di consumo d’Idrogeno e di efficienza operativa della *fuel-cell*, richiedendone anche uno spegnimento non molto frequente.

Un ulteriore ed interessante aspetto legato all’EMS di un veicolo impiegante le *fuel-cells* è rintracciabile in [11]. Si studiano qui, infatti, gli effetti sulle prestazioni di due CS delle tipologie precedentemente descritte da un lato dell’invecchiamento del *fuel-cell system* (FCS) e dall’altro del *thermal management system* (TMS). Le CS considerate sono la DP e una strategia afferente alla categoria delle HCT denominata *Bounded Load Following Strategy* (BLFS). Tale BLFS costituisce un ulteriore esempio di CS impiegabile in *real-time* ed è concepita in modo da restringere il campo di funzionamento della *fuel-cell* tra il punto di potenza a massima efficienza ed il punto a massima potenza. Sulla base del valore di SOC e della potenza richiesta possono essere scelte tre modalità operative:

1. FCS spento;
2. FCS operante al punto di massima efficienza;
3. FCS operante al punto di massima potenza.

Quando il FCS è acceso si può operare secondo il terzo modo in elenco solo quando lo SOC scende sotto un suo valore minimo. E' assai interessante valutare, dapprima a livello generale, gli effetti dell'invecchiamento sulle caratteristiche sperimentali del FCS ivi considerato, come visibile in figure 1.3.8 e 1.3.9. Dalla figura 1.3.8 si nota come un determinato valore di potenza richiesta possa essere ottenuto con molteplici combinazioni di corrente alla *fuel-cell* e temperatura della medesima. In particolare i punti con il minor valore di corrente per ciascun valore di potenza sono evidenziati con dei piccoli cerchi per la *fuel-cell* nuova e con dei piccoli rombi per la *fuel-cell* invecchiata. Connettendo questi *markers* si ottengono le curve con il valore di corrente e temperatura ottimale per ciascun livello di potenza. In figura 1.3.9 si riportano invece le curve ottimali del consumo d'Idrogeno per ciascun valore di corrente, sia nel caso di *fuel-cell* nuova che ne caso di *fuel-cell* invecchiata.

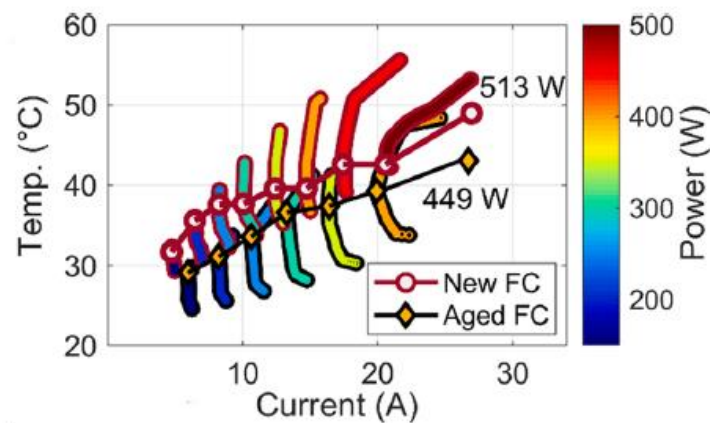


Figura 1.3.8: caratteristica sperimentale corrente-temperatura-potenza. Fonte [11].

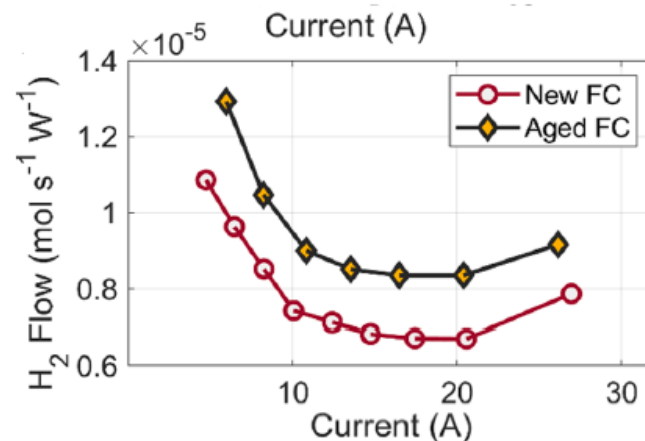


Figura 1.3.9: caratteristica sperimentale del consumo d'Idrogeno. Fonte [11].

Come si può notare, uno stesso valore di potenza è ottenibile, in una *fuel-cell* invecchiata, con un valore di corrente e temperatura decisamente più elevato. Ciò comporta una evidente disparità in termini di consumo di combustibile. Inoltre il livello massimo di potenza raggiungibile da una *fuel-cell* invecchiata è inferiore.

Si sono poi valutate le *performances* degli EMS su due cicli guida: il WLTC di classe 2 e il *West Virginia Interstate Driving Schedule* (CYC_WVUINTER). In particolare si sono considerate quattro condizioni per ciascun EMS:

1. EMS con una sola variabile di controllo (ossia la corrente della *fuel-cell*) per la *fuel-cell* nuova (1D-NewFC);

2. EMS con una sola variabile di controllo per la *fuel-cell* usata (1D-AgedFC);
3. EMS con una sola variabile di controllo ma con un *false-input* (1D - FI). Per la DP si impiega la strategia di controllo 1D-NewFC ma con una *fuel-cell* invecchiata: si analizza così l'effetto dell'*ageing* sulla EMS ottimale. Per la BLFS si impiega la *fuel-cell* usata ma mantenendo le regole impiegate nel caso 1: si analizza così l'effetto sulla *fuel economy* dell'operare la *fuel-cell* non tenendo conto del suo invecchiamento;
4. EMS con due variabili di controllo (ossia corrente della *fuel-cell* e *duty-cycle* della ventola di raffreddamento) e *fuel-cell* nuova.

Dall'analisi dei risultati delle svariate prove sopra descritte emerge che:

- L'invecchiamento della FC ha causato un incremento del consumo d'Idrogeno dall'11.7% al 14.7% per la DP e dal 3.2% al 7% per la BLFS;
- Il non adattamento delle CS all'invecchiamento della FC ha causato un incremento del consumo d'Idrogeno dal 7.6% all'8.7% per la DP e dal 4.2% al 4.7% per la BLFS;
- Il passaggio da una variabile di controllo a due variabili di controllo ha determinato un decremento del consumo d'Idrogeno dal 2.9% al 4.1% per la DP e dal 3.8% al 5.3% per la BLFS.

E' ora utile riassumere le caratteristiche salienti delle CS considerate nel presente capitolo, secondo lo schema riportato in tabella 1.3.1.

Tabella 1.3.1. Caratteristiche salienti delle strategie di controllo analizzate.

Strategia (Tipologia)	Punti di forza	Punti di debolezza
ECMS (SOS)	<p>Buona precisione di calcolo di consumo di Idrogeno e ottimi risultati nella minimizzazione dei consumi;</p> <p>Strategia robusta in un ampio <i>range</i> di condizioni operative;</p> <p>Consumi di Idrogeno in generale minori rispetto alle strategie <i>Rule-Based</i>.</p>	<p>Scelta degli <i>equivalence factors</i>;</p> <p>Gli <i>equivalence factors</i> possono garantire l'ottimalità solo per un numero limitato di cicli;</p> <p>Costo computazionale maggiore rispetto a strategie del tipo <i>Rule-Based</i>.</p>
FES (SOS)	<p>L'approccio è simile ad una ECMS ma lo <i>weighing factor</i> è adattabile <i>on-line</i>, senza richiedere la conoscenza della domanda futura di potenza ordinata nel tempo ma solo la sua distribuzione;</p> <p>La predizione del nuovo <i>weighing factor</i> è veloce a livello computazionale;</p> <p>Ottimi risultati in termini di <i>fuel economy</i>.</p>	<p>Nella strategia non si tiene conto delle problematiche di <i>aging</i> della fuel cell e dell'ESS;</p> <p>L'utilizzo della fuel cell è relativamente dinamico, con numerosi cicli di start – stop.</p>
RBCS (HCT)	<p>Algoritmo relativamente semplice e agevole implementazione in <i>real-time</i>.</p>	<p>Definizione delle regole;</p> <p>Non molto adatta ad un'ottimizzazione multi-obiettivo;</p> <p>Possibili condizioni sub-ottimali nell'applicazione in tempo reale.</p>

MAP BASED (HCT)	<p>Semplice implementazione in <i>real-time</i> e buona <i>performance</i>;</p> <p>La definizione delle mappe per le condizioni di funzionamento non è particolarmente complicata;</p> <p>Buoni risultati in termini di consumo d'Idrogeno rispetto al risultato di una GOS.</p>	<p>Ottimizzazione su un numero finito di cicli guida;</p> <p>Non si considerano aspetti legati alla degradazione col tempo della <i>fuel-cell</i>.</p>
FUZZY (HCT)	<p>Si possono applicare strategie per evitare un invecchiamento precoce dei componenti;</p> <p>Buoni risultati in termini di <i>fuel-economy</i>.</p>	<p>Definizione delle regole fuzzy e delle <i>membership functions</i>;</p> <p>Il <i>fuzzy set</i> è definito a priori e garantisce l'ottimo solo per un numero limitato di cicli;</p> <p>Possibili situazioni in cui la <i>fuel economy</i> non sia soddisfacente.</p>
ALS (HCT)	<p>Non si usano regole o stime per la minimizzazione del consumo di carburante;</p> <p>Utilizzo di semplici <i>look-up tables</i>;</p> <p>Miglioramento del consumo di Idrogeno rispetto ad una comune strategia <i>Rule Based</i> ed utilizzo della fuel cell meno dinamico.</p>	<p>Vengono prese delle misure per limitare l'<i>aging</i> della fuel cell ma dai risultati emerge un alto numero di start/stop e la fuel cell opera comunque spesso in transitorio;</p> <p>Utilizzo della batteria abbastanza dinamico;</p> <p>L'invecchiamento della fuel cell potrebbe causare una importante degradazione delle prestazioni della strategia.</p>

2. Realizzazione del modello di veicolo

Nel presente capitolo si descriveranno la realizzazione del modello virtuale del veicolo di tipo *heavy-duty* (HD) delineato nel paragrafo 1.2 nonché le caratteristiche, l'implementazione e l'ottimizzazione della strategia di controllo scelta a seguito della ricerca in letteratura esposta nel paragrafo 1.3. Per la realizzazione del modello di veicolo si è scelto di utilizzare il software Simulink. In particolare, tale modello basa il suo funzionamento su uno *script* Matlab in cui sono contenuti tutti i dati relativi, ad esempio, alle mappe d'efficienza del motore elettrico, della FC, ecc. Nello *script* citato sono anche implementate tutte le equazioni utili allo svolgimento della simulazione. Al fine di lanciare una simulazione mediante detto modello Simulink è necessario dapprima caricare nel *workspace* di Matlab tutte le variabili sopra citate, di modo che Simulink possa attingervi.

2.1 – Realizzazione del modello Simulink

Come visibile in figura 2.1.1, il modello di veicolo *Fuel-Cell Hybrid Electric Vehicle* (FCHEV) realizzato è costituito da vari sottosistemi rappresentanti i componenti del *powertrain*. In particolare tali *subsystems* di Simulink sono:

- modello di **driver**;
- sottosistema per la **dinamica longitudinale** del veicolo;
- sottosistema per modellare la **trasmissione**;
- sottosistema per il **motore elettrico** di trazione con apposito sottoblocco per il controllo dei limiti di coppia;
- sottosistema per la **batteria**;
- sottosistema per la **fuel cell**;
- blocco stateflow per la **strategia di controllo**.

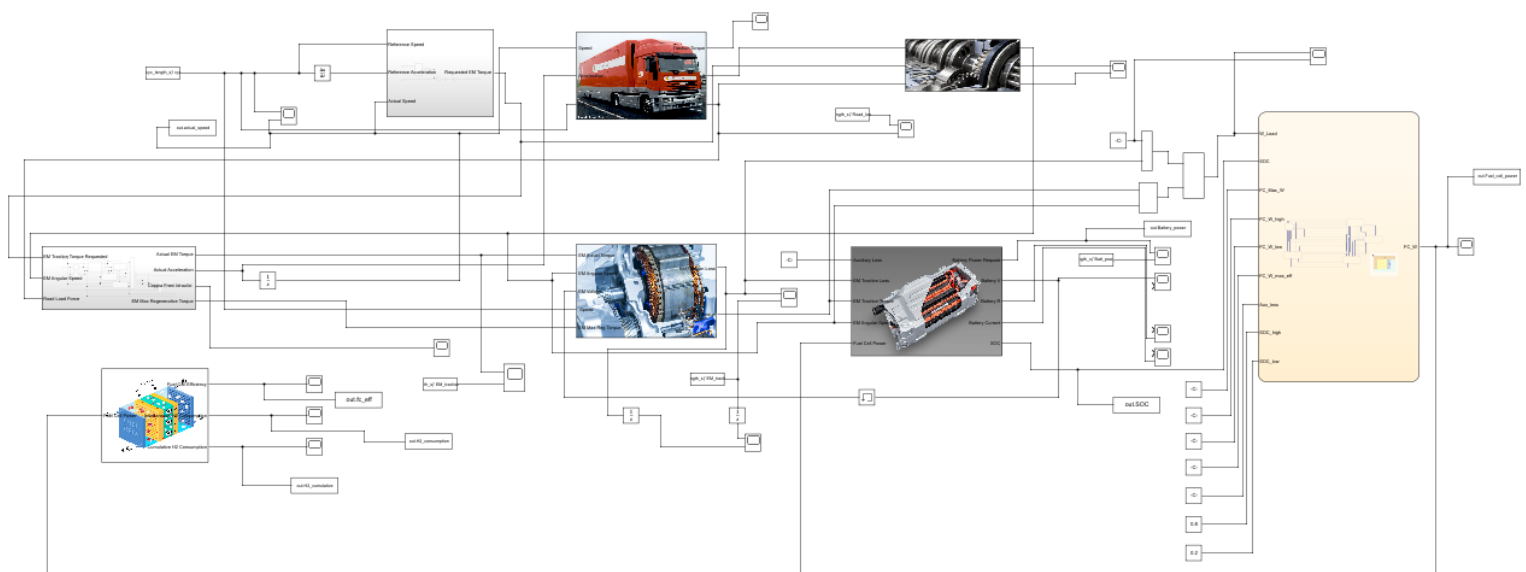


Figura 2.1.1: Visione d'insieme del modello Simulink.

All'interno del modello di **driver** si confronta la velocità di riferimento data dal profilo del ciclo guida con l'effettiva velocità del veicolo, generando così un segnale d'errore che viene limitato attraverso un controllore PID ricavato dalla libreria Simulink. In uscita al controllore è generato un segnale di accelerazione richiesta al veicolo che può facilmente essere tradotto in una richiesta di coppia al motore elettrico di trazione con l'ausilio degli altri sottosistemi presenti. I parametri del controllore PID sono stati ricavati attraverso un processo di *autotuning* presente tra le funzionalità del componente Simulink ed in particolare si è scelta un'intonazione del tipo *reference tracking* (con aggiunta di alcune modifiche manuali) in modo da seguire al meglio il profilo di velocità *target* simulando la presenza di un vero guidatore. I parametri del controllore così ottenuti sono riportati in tabella 2.1.1.

Tabella 2.1.1. Parametri caratteristici del controllore PID presente nel modello di *driver*.

Parametro	Valore del parametro
Guadagno proporzionale (P)	1.7
Guadagno integrale (I)	0.005
Guadagno derivativo (D)	-0.46619
Coefficiente di filtraggio derivativo (N)	1.72044

All'interno del *subsystem dinamica longitudinale* si calcolano le *road load forces* attraverso l'equazione 2.1.1:

$$F = C_r * massa_{veicolo} * sign(velocità_{veicolo}) + \frac{1}{2} * \rho_{aria} * C_d * A_{frontale} * velocità_{veicolo}^2 + massa_{veicolo} * g * \sin(\beta) \quad (2.1.1)$$

In cui si è indicato con C_r il coefficiente di resistenza al rotolamento degli pneumatici, con C_d il coefficiente di resistenza aerodinamica del veicolo, con ρ_{aria} la densità dell'aria, con g la forza di gravità e con β l'angolo d'inclinazione del terreno. Si può così calcolare la coppia necessaria alla trazione del veicolo secondo l'equazione 2.1.2:

$$T_{trazione} = (F + massa_{veicolo} * a) * r_{dyn} \quad (2.1.2)$$

In cui si è indicato con r_{dyn} il raggio dinamico delle ruote del veicolo e con a l'accelerazione del medesimo.

Nel *subsystem trasmissione* si calcola la velocità angolare del motore elettrico di trazione secondo l'equazione 2.1.3:

$$\omega_{mot} = \left(\frac{velocità_{veicolo}}{r_{dyn}} \right) * \tau \quad (2.1.3)$$

In cui si è indicato con τ il rapporto di trasmissione tra l'asse del motore elettrico e l'asse delle ruote motrici, considerato costante e pari a 7.5. Inoltre è possibile calcolare la coppia e la potenza persa alla trasmissione mediante le equazioni 2.1.4 e 2.1.5:

$$T_{loss} = |T_{trazione} * \tau| * (1 - \eta_{gear}) \quad (2.1.4)$$

$$P_{loss} = T_{loss} * \omega_{wheels} \quad (2.1.5)$$

In cui si è indicata con η_{gear} l'efficienza della trasmissione, considerata costante e pari a 0.94, e con ω_{wheels} la velocità angolare di rotazione delle ruote.

Nel *subsystem controllo limiti motore elettrico* utilizzando due *look-up tables* bidimensionali (i cui dati sono importati come precedentemente citato dal *Matlab Workspace*) si valutano istante per istante la massima coppia di trazione e di frenata ottenibili dal motore elettrico in funzione della sua velocità di rotazione. Si riporta a titolo d'esempio la caratteristica di coppia massima di trazione in figura 2.1.2.

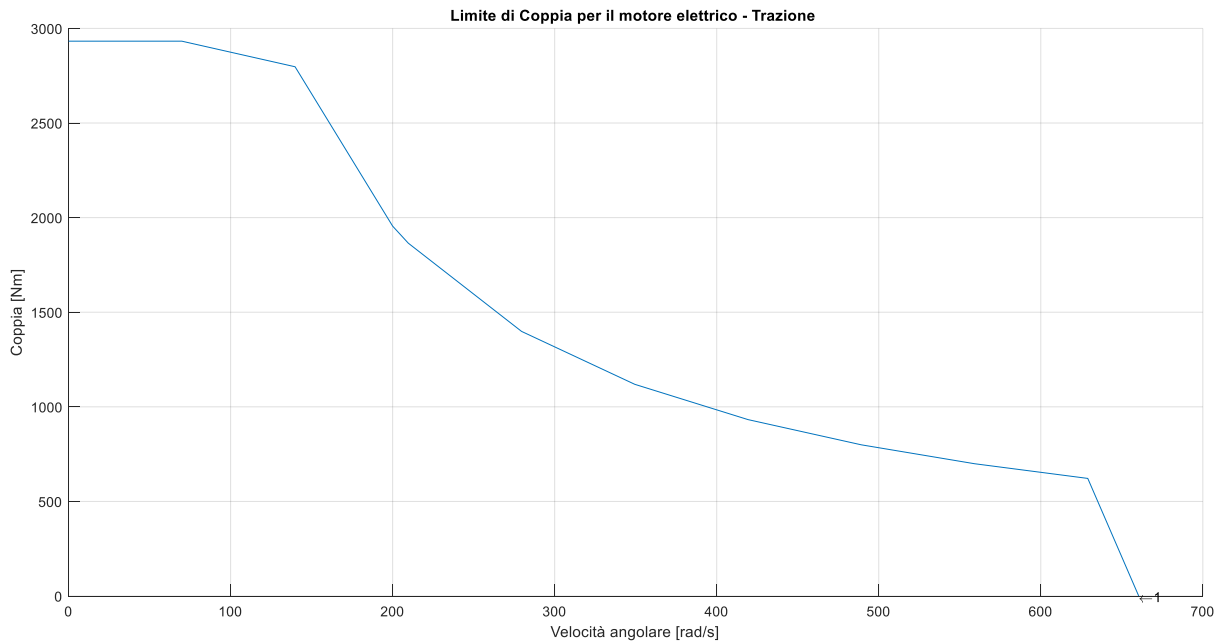


Figura 2.1.2: Coppia massima di trazione in funzione della velocità angolare del motore elettrico.

Mediante un semplice sistema a condizioni *if-else* si vaglia istante per istante la coppia richiesta al motore elettrico e, sulla base dei dati forniti dalle due *look-up tables* citate, si satura all'occorrenza tale coppia per evitare di superare i limiti imposti dalle caratteristiche del motore elettrico stesso. Si è anche implementata la presenza di freni idraulici evitando di saturare la coppia in frenata e si è calcolata per differenza la coppia erogata da tali freni. Attraverso la coppia richiesta al motore elettrico vagliata in questo sottosistema è quindi calcolabile l'effettiva accelerazione del veicolo mediante l'equazione 2.1.6 e, integrandola nel tempo, l'effettiva velocità del veicolo. E' importante precisare come il controllo dei limiti di coppia del motore elettrico nell'ambito della frenata sia comunque effettuato in modo che il motore elettrico non assorba in frenata una coppia eccedente rispetto ai propri limiti.

$$a_{eff} = \frac{\left(\left(T_{EM} * \eta_{gear}^{sign(T_{EM})} * \left(\frac{\tau}{r_{dyn}} \right) \right) - F \right)}{massa_{veicolo}} \quad (2.1.6)$$

Si è qui indicata con T_{EM} la coppia effettiva del motore elettrico ottenuta a valle del controllo dei limiti sopra citato. L'effettiva velocità del veicolo è poi inviata al sottosistema del *driver* per essere impiegata come variabile decisionale nel controllore PID.

Nel *subsystem motore elettrico di trazione* vengono invece calcolate le perdite del medesimo utilizzando una *look-up table* tridimensionale in funzione della velocità angolare, della coppia richiesta e del voltaggio applicato. Come accennato all'inizio del presente capitolo i dati costitutivi della mappa tridimensionale sono memorizzati nel *Matlab Workspace*. Si riporta in figura 2.1.3 tale mappa delle perdite.

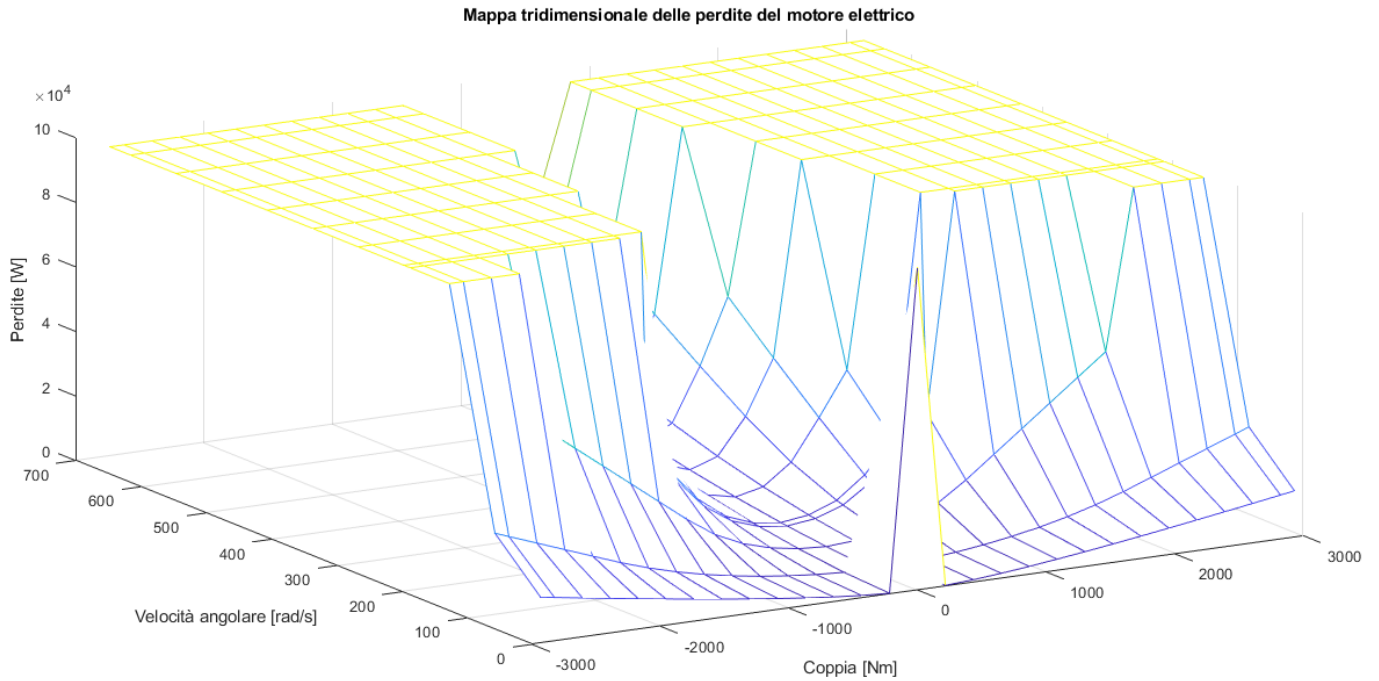


Figura 2.1.3: Mappa tridimensionale delle perdite del motore elettrico.

La **batteria** impiegata nel modello di veicolo è costituita da 150 celle in serie su 10 rami in parallelo ed è caratterizzata da una capacità di 246.5kWh. Nel *subsystem* ad essa dedicato si calcola in primo luogo la potenza ad essa richiesta mediante l'equazione 2.1.7:

$$P_{batt} = P_{EM} + LOSS_{EM} + P_{aux} - P_{FC} \quad (2.1.7)$$

In cui si è indicata con P_{EM} la potenza del motore elettrico, con $LOSS_{EM}$ le perdite del motore elettrico, con P_{aux} la potenza richiesta dagli ausiliari (considerata costante e pari a 4860W) e con P_{FC} la potenza richiesta alla *fuel-cell stack*. E' qui poi presente un vero e proprio *loop* in cui si calcola da un lato la corrente richiesta alla batteria secondo l'equazione del circuito equivalente 2.1.8 e dall'altro lo SOC mediante l'equazione 2.1.9.

$$I_{batteria} = \frac{W_{batteria}}{\sqrt{V_{batteria}^2 - 4R_{batteria} * W_{batteria} + \frac{V_{batteria}^2}{2}}} \quad (2.1.8)$$

$$SOC = SOC_{start} - \frac{\int I_{batteria}}{Capacità_{nominale}} \quad (2.1.9)$$

Nella 2.1.8 si è indicata con $W_{batteria}$ la potenza ad essa richiesta, con $V_{batteria}$ la tensione di circuito aperto e con $R_{batteria}$ la resistenza interna. Per il calcolo di questi ultimi due parametri sono presenti quattro *look-up tables* bidimensionali in funzione dello SOC. Tali mappe sono,

come accennato in precedenza, memorizzata nel *Matlab Workspace* e ne si riporta un esempio in figura 2.1.4.

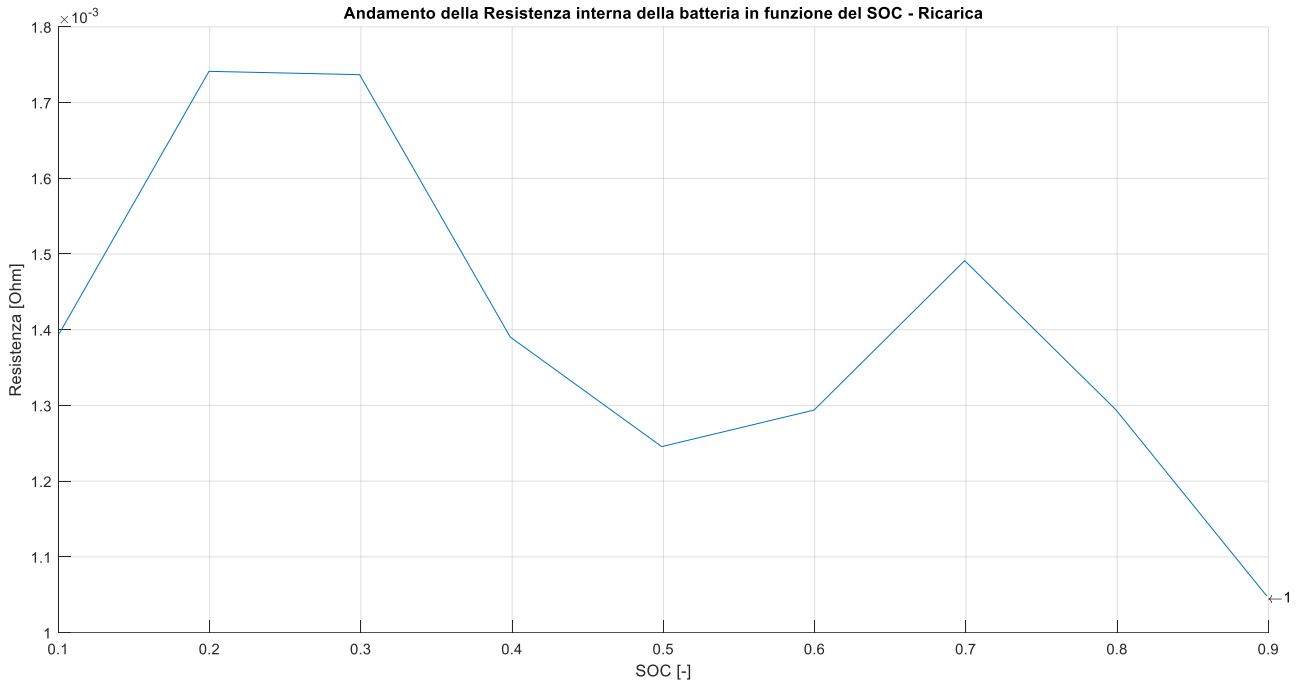


Figura 2.1.4: Mappa bidimensionale per il calcolo della resistenza interna della batteria in condizioni di ricarica.

Le caratteristiche in esame sono differenziate a seconda che la batteria si trovi in condizioni di scarica o di ricarica e, vagliando il segno della potenza richiesta alla batteria, un sistema *if-else* provvede a smistare il calcolo sulle mappe opportune istante per istante.

La ***fuel-cell stack*** impiegata è costituita da 3 rami in parallelo di 700 celle ciascuno ed ha una potenza massima di 200kW. Nel *subsystem* che la riguarda si calcola in prima istanza istante per istante il valore di efficienza che ne caratterizza il funzionamento, interpolando su una *look-up table* bidimensionale riportata in figura 2.1.5. Come si può osservare in essa il valore massimo di efficienza risulta pari a 0.49. Il valore di potenza richiesto è stabilito dalla strategia di controllo. Si calcola inoltre il valore del consumo istantaneo d'Idrogeno tramite l'implementazione dell'equazione 2.1.10, in cui LHV_{H_2} è il potere calorifico inferiore dell'Idrogeno espresso in Joule per grammo, W_{FC} è la potenza richiesta alla *fuel-cell* ed η_{FC} è il valore di efficienza precedentemente citato.

$$H2_{istantaneo} = \frac{\frac{W_{FC}}{\eta_{FC}}}{LHV_{H_2}} \quad (2.1.10)$$

Si integra anche il consumo istantaneo d'Idrogeno per ottenere l'andamento cumulato nel tempo del consumo di combustibile.

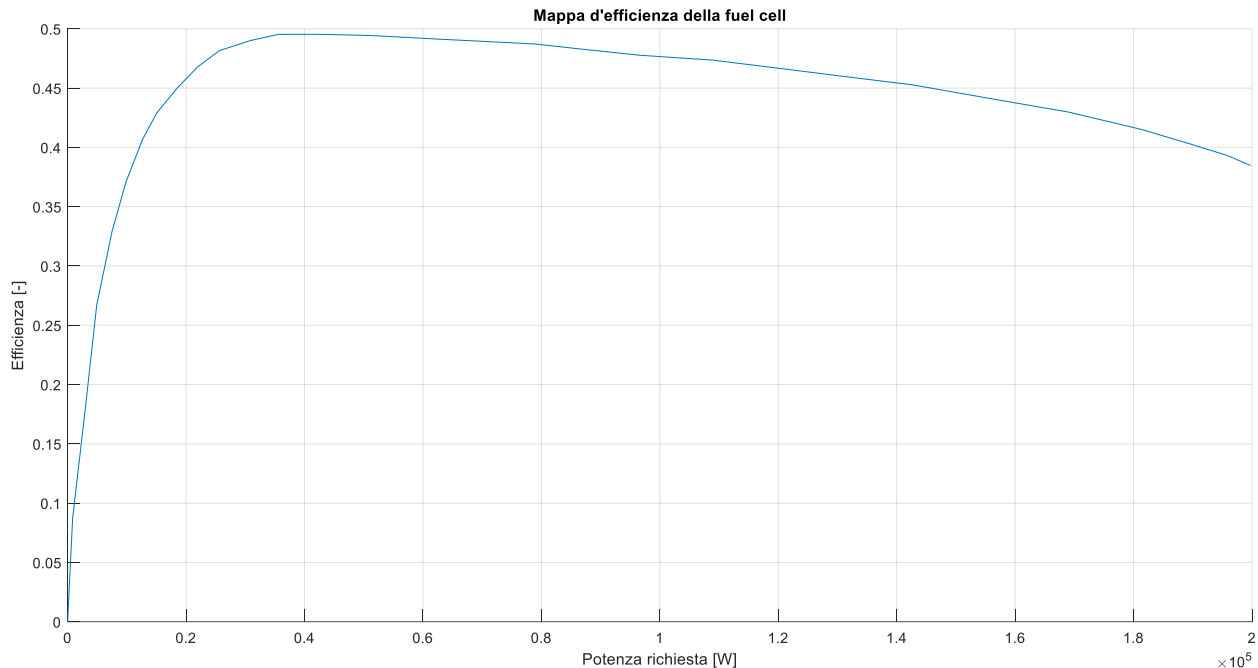


Figura 2.1.5: Caratteristica d'efficienza della *fuel-cell*.

2.2 – Implementazione della strategia di controllo

Sulla base della ricerca in letteratura esposta nel capitolo 1.3 si è deciso di utilizzare nell'ambito del modello Simulink descritto poc'anzi la seconda strategia di controllo presentata in [4]. La CS in esame è stata selezionata in quanto risulta in primo luogo facilmente implementabile *on-line* su una reale ECU ed in secondo luogo poiché dall'articolo scientifico sembra avere un buon comportamento in termini di consumo di carburante e tende ad operare la FC ad elevata efficienza. Si pensi, per esempio, che nel *paper* [4] la percentuale massima di incremento di consumo d'Idrogeno rispetto ad una strategia GOS è del 7.5%. Inoltre la CS considerata è di facile implementazione su un *software* come Simulink ed in base alla sua struttura l'ottimizzazione dei parametri che la definiscono è agevole. Va però ricordato che la tipologia di *powertrain* per la quale tale CS è stata ottimizzata in letteratura è opposta rispetto a quella del veicolo considerato nel presente lavoro di tesi. In [4] si considera infatti un veicolo del tipo *passenger-car* di piccole dimensioni, la cui *fuel-cell stack* ha una potenza massima di soli 15kW (mentre il *truck* qui considerato dispone di una FC con potenza massima pari a 200kW) e che dispone anche di un supercondensatore nel proprio *powertrain*. Come è evidente, i cicli guida utilizzati per l'ottimizzazione della CS in [4] sono altrettanto differenti rispetto a quelli impiegati nel presente elaborato (e che verranno trattati nei successivi capitoli) ed in particolare essi sono il *New European Driving Cycle* (NEDC), lo *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS), il *Federal Test Procedure 75* (FTP-75) e lo *Highway Fuel Economy Test Cycle* (HWFET). In questo senso, anche per tali ragioni si è resa necessaria una nuova ottimizzazione della strategia *map-based* che verrà esposta nel capitolo ad essa dedicato.

Al fine di comprendere il funzionamento della CS del tipo *map-based* è utile osservare la mappa bidimensionale riportata in figura 2.2.1, direttamente espunta da [4]. Come si vede, esistono quattro fondamentali modalità operative per la FC. Nella zona gialla essa è operata al punto di massima efficienza, nella zona blu è operata in modo da soddisfare completamente la richiesta

di potenza dell'intero carico elettrico, nella zona marrone è operata ad un valore di potenza basso ($P_{fcs,low}$) mentre nella zona azzurra è operata ad un valore di potenza elevato ($P_{fcs,max}$). Le due variabili decisionali sulla base delle quali si determina istante per istante la modalità operativa della FC sono rispettivamente lo *State of Energy* (SOE) e la potenza richiesta dal carico elettrico P_{load} .

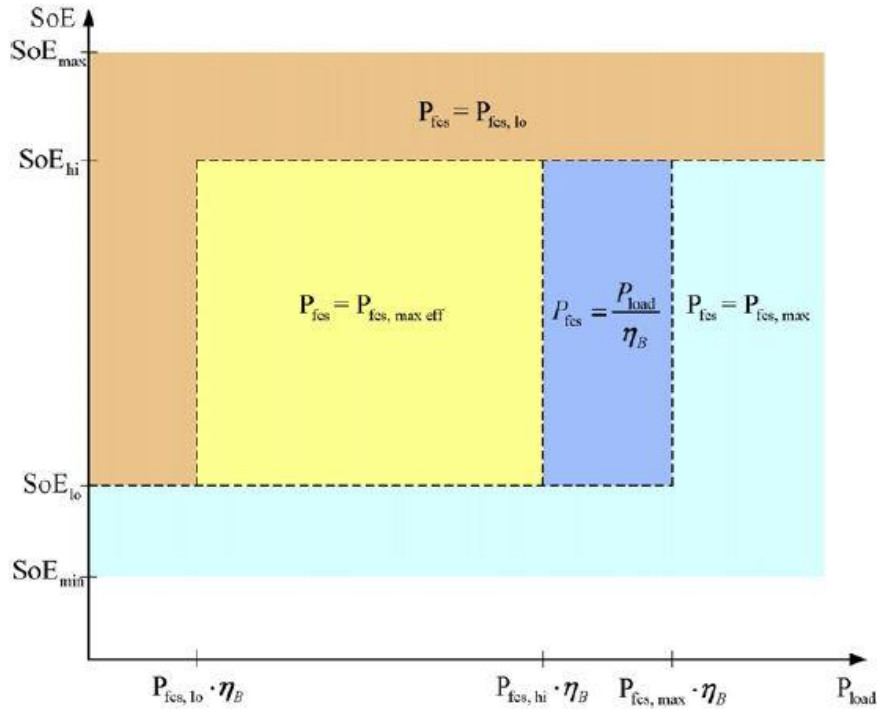


Figura 2.2.1: Mapa di funzionamento della strategia *map-based*. Fonte [4].

La CS, sulla base del valore delle due variabili decisionali sopra citate, imposta istante per istante il valore di potenza richiesta alla FC obbedendo alle seguenti regole:

- Fin tanto che lo SOE è superiore ad un valore basso (SOE_{lo}) e la P_{load} è inferiore ad un valore basso ($P_{fcs,lo}$) oppure se il SOE è superiore ad un valore elevato (SOE_{hi}) la FC è operata ad un valore di potenza basso ($P_{fcs,lo}$);
- Se lo SOE è inferiore ad un valore basso (SOE_{lo}) oppure se lo SOE è inferiore ad un valore alto (SOE_{hi}) e la P_{load} è superiore ad un valore massimo ($P_{fcs,max}$) la FC è operata ad un valore di potenza massimo ($P_{fcs,max}$);
- Se lo SOE è compreso tra il valore basso (SOE_{lo}) ed il valore alto (SOE_{hi}) e la P_{load} è compresa tra il suo valore basso ($P_{fcs,lo}$) ed un suo valore elevato ($P_{fcs,hi}$), la FC è operata al punto di massima efficienza ($P_{fcs,max,eff}$);
- Se lo SOE è compreso tra il valore basso (SOE_{lo}) e il valore elevato (SOE_{hi}) e la P_{load} è superiore ad un suo valore elevato ($P_{fcs,hi}$) ma comunque inferiore al suo valore massimo ($P_{fcs,max}$), la FC è operata in modo da seguire la richiesta di potenza dell'intero carico elettrico;
- Se lo SOE è superiore al suo valore massimo (SOE_{max}) la FC è spenta.

Come visibile in figura 2.2.1 nella mappa compare anche un valore di efficienza η_B a moltiplicare o dividere alcuni dei valori poc'anzi citati. Tale η_B rappresenta il valore di

efficienza del convertitore elettronico di potenza del tipo *boost* presente nel *powertrain* considerato in [4]. Data la presenza di un supercondensatore non si è utilizzato lo SOC come variabile decisionale ma bensì lo SOE. Oltre alle regole sopra elencate la CS opera in modo da limitare l'ampiezza dei transitori di potenza alla *fuel-cell*. In particolare:

- La potenza scelta dalla CS è pari al valore minimo tra la potenza *target* e la medesima sommata al 10% della potenza massima (transitorio di crescita);
- La potenza scelta dalla CS è pari al valore massimo tra la potenza *target* e la medesima ridotta del 30% della potenza massima (transitorio di riduzione);

E' utile quantificare i parametri visibili in figura 2.2.1 che sono stati impiegati in [4]. A tale scopo ne si riportano i valori in tabella 2.2.1.

Tabella 2.2.1. Parametri caratteristici della CS impiegati in [4].

Parametro	Valore
SOE_{max}	1
SOE_{min}	0.2
SOE_{hi}	0.9
SOE_{low}	0.3
$P_{fcs,max}$	15kW
$P_{fcs,maxeff}$	6kW
$P_{fcs,lo}$	1kW
$P_{fcs,hi}$	12kW
η_B	0.95

Come è possibile osservare, con la calibrazione svolta in [4] l'area in cui si opera la FC al punto di massima efficienza è decisamente maggioritaria. In questo modo la strategia *map-based* riesce lungo i cicli guida qui considerati (NEDC, UDDS, FTP, HWFET) ad operare la FC spesso al punto di massima efficienza, ottenendo un consumo di carburante non eccessivamente superiore rispetto al caso ottimale.

Per l'implementazione della strategia *map-based* in esame nel presente capitolo all'interno del modello di veicolo FCHEV realizzato mediante Simulink si è scelto di impiegare il *tool* Stateflow vista l'affinità con la tipologia di applicazione. Si riporta in figura 2.2.2 il diagramma a blocchi risultante. In particolare è bene sottolineare che, viste le differenze in termini di *powertrain* e data l'assenza sia di un supercondensatore che di un convertitore elettronico di potenza nel modello di veicolo *heavy-duty* considerato nel presente lavoro di tesi, nell'implementare la CS in Stateflow si è considerato come variabile decisionale lo SOC e non lo SOE e non si è impiegata l'efficienza η_B precedentemente menzionata.

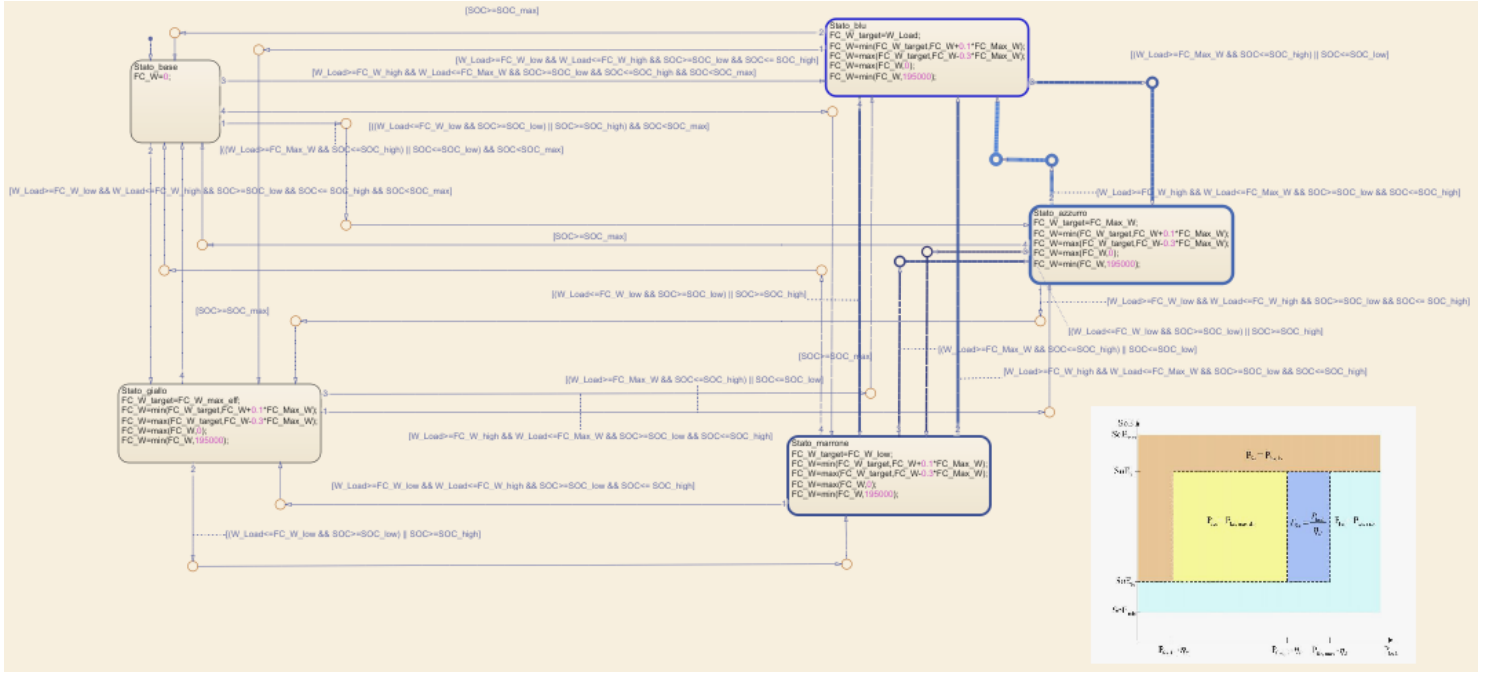


Figura 2.2.2: Subsystem Stateflow per la strategia di controllo durante lo svolgimento di una simulazione.

2.3 – Analisi delle discrepanze Matlab-Simulink

Nel presente paragrafo si riportano alcune analisi e considerazioni relative ad una fase intermedia dello sviluppo del modello Simulink trattato nel presente capitolo. In particolare ci si riferisce ad una condizione in cui detto modello aveva assunto già sostanzialmente la forma descritta nel paragrafo 2.1 ma non era presente la strategia di controllo. In tale condizione il modello poteva funzionare esclusivamente in *open-loop* e cioè utilizzando un profilo di potenza richiesta alla FC già esistente, attinto dal *Matlab Workspace*. Come infatti si è detto nei capitoli precedenti, lo *script* Malab dal quale il modello Simulink ottiene i dati necessari al proprio funzionamento può effettuare una simulazione impiegando come strategia di controllo una semplice *rule-based control strategy* di pura invenzione. Tale strategia è così costituita:

- Se lo SOC è superiore a 0.7 la *fuel-cell* è spenta;
- Se lo SOC è inferiore a 0.7 ma comunque superiore a 0.15 si opera la FC al punto di massima efficienza e si continua in tal maniera sin tanto che lo SOC è inferiore a 0.85;
- Se lo SOC è inferiore a 0.15 la FC è operata ad un valore di potenza pari al massimo tra la potenza di massima efficienza e la potenza richiesta per soddisfare l'intero carico elettrico richiesto al veicolo.

Effettuando delle simulazioni mediante il modello Simulink funzionante in *open-loop* impiegando un ciclo denominato “CARB-Heavyduty”, di cui si tratterà nel capitolo dedicato ai cicli guida, e confrontando i risultati con quelli ottenuti dallo *script* Matlab si sono notate alcune discrepanze. In particolare tali discrepanze non sono tanto legate a *subsystems* nella prima parte del *loop* di calcolo del modello, e quindi al driver e ai sottosistemi per la dinamica longitudinale del veicolo, ma bensì ai sotto-modelli riguardanti il motore elettrico e la batteria. Infatti, come visibile in figura 2.3.1 il driver segue bene il profilo del ciclo guida di riferimento e sono solo presenti delle differenze chiaramente legate al fatto che si simula qui la presenza di un reale

guidatore che non può in alcun caso seguire alla perfezione il profilo di velocità *target* che gli è assegnato. Inoltre possono anche essere presenti condizioni in cui tale profilo di velocità richiesta non sia effettivamente realizzabile dal veicolo a causa dei limiti fisici dei componenti di trazione che caratterizzano il *powertrain*. Si riporta in figura 2.3.2 un esempio delle diversità citate poc' anzi in uno *zoom* della figura 2.3.1.

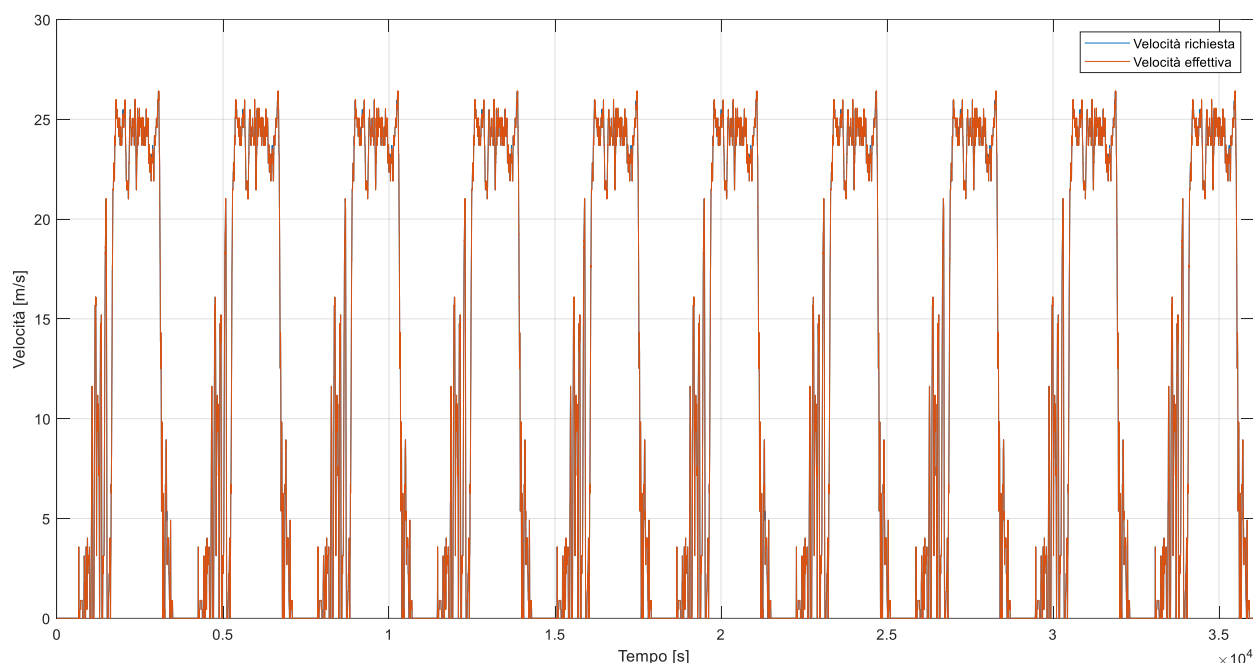


Figura 2.3.1: Ciclo guida CARB-Haevy duty.

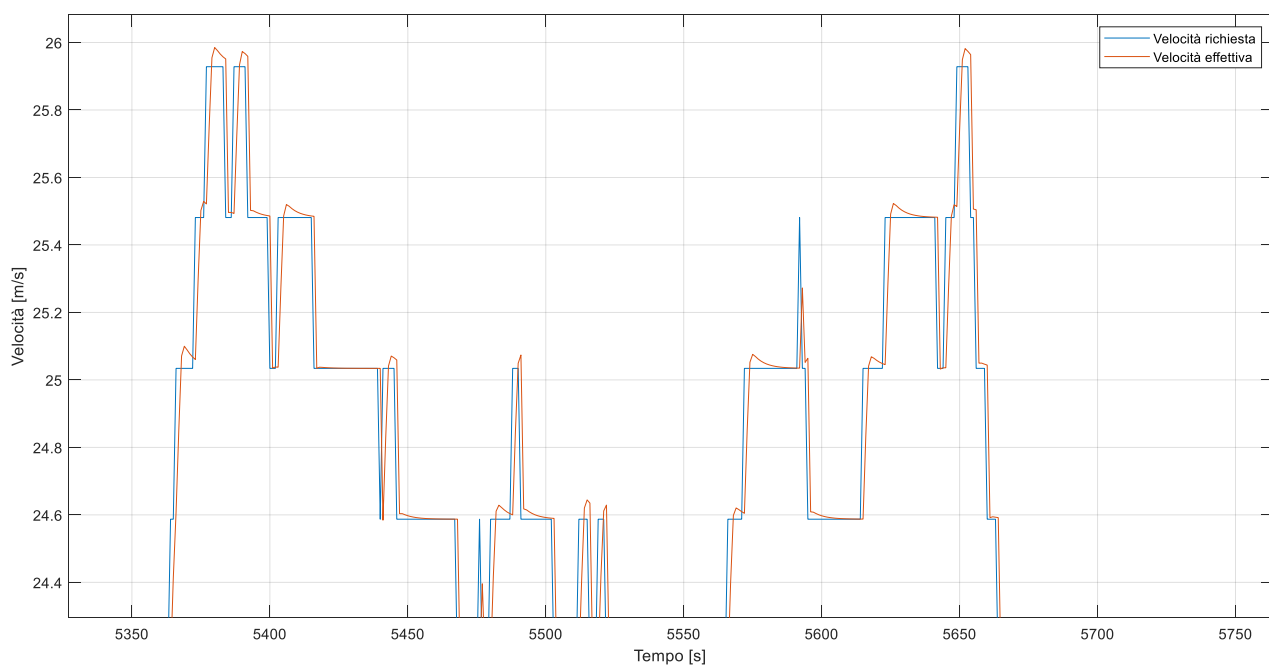


Figura 2.3.2: Visione di dettaglio di un tratto del ciclo guida CARB-Heavyduty.

Allo stesso modo anche i profili delle *road-load forces* riportati in figura 2.3.3 non dimostrano particolari discrepanze se non dovute alle piccole differenze nei profili di velocità effettivamente seguiti dal veicolo.

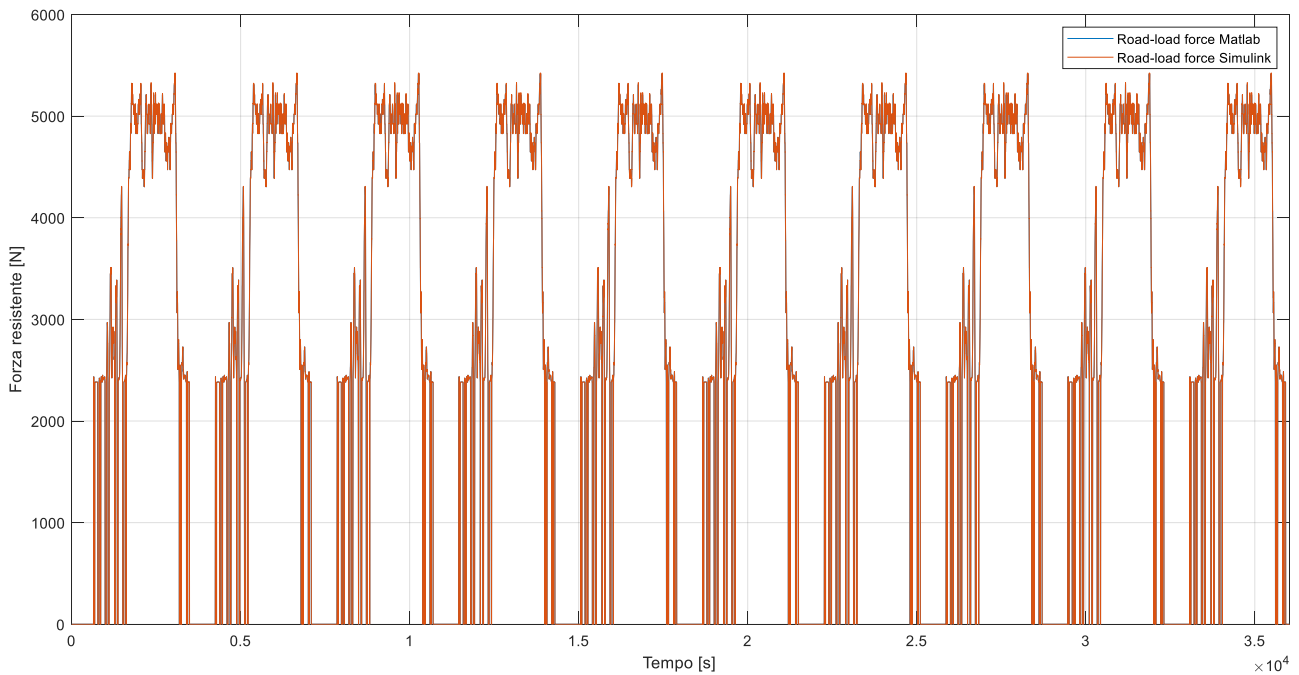


Figura 2.3.3: Andamento delle forze di resistenza all'avanzamento del veicolo per il ciclo CARB-Heavyduty.

Considerando invece l'andamento delle perdite del motore elettrico di trazione riportato in figura 2.3.4 sono rintracciabili delle differenze leggermente più marcate.

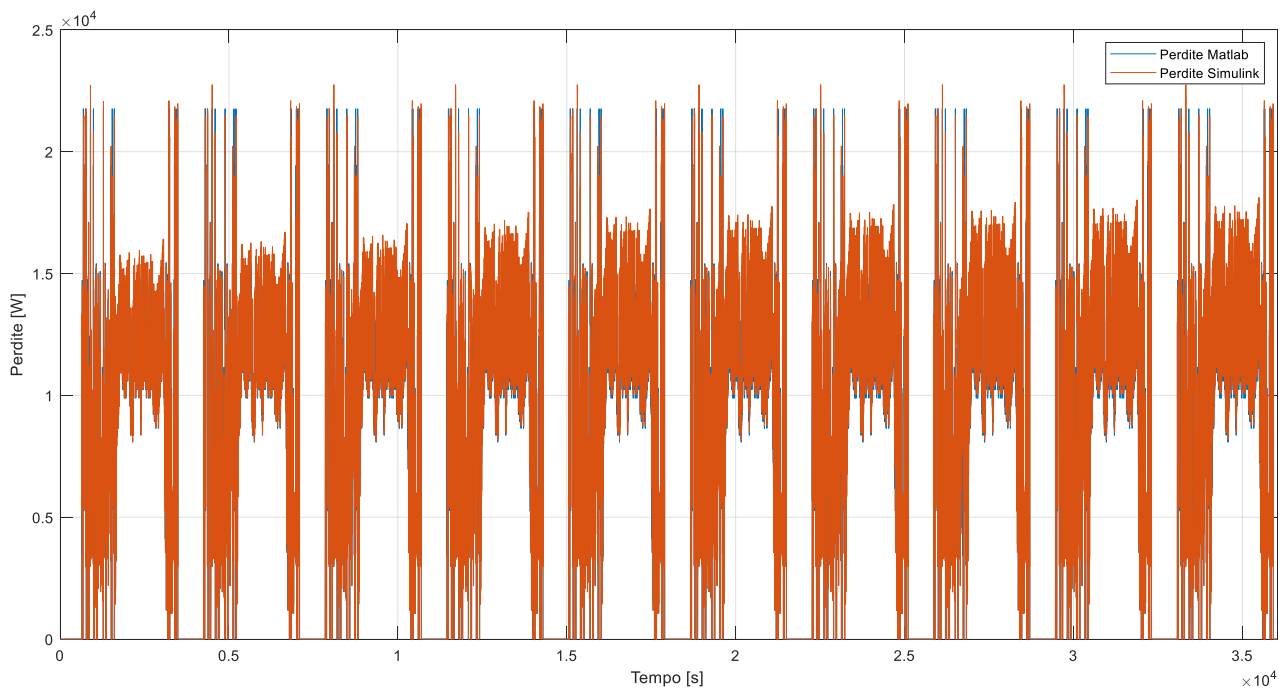


Figura 2.3.4: Andamento delle perdite del motore elettrico su ciclo CARB-Heavyduty.

Per valutare l'impatto globale delle differenze sopra rilevate si sono integrati nel tempo gli andamenti delle perdite ottenendo i risultati riportati in tabella 2.3.1.

Tabella 2.3.1. Risultati dell'integrazione nel tempo dei segnali di perdita del motore elettrico.

Segnale	Valore perdita
Matlab	$25.97 * 10^7 J$
Simulink	$26.25 * 10^7 J$

Come si può facilmente calcolare, il valore dato dal modello Simulink funzionante in *open-loop* è superiore dello 1.08% rispetto a quanto risulta da Matlab.

Le differenze più evidenti si hanno però al *subsystem* relativo al pacco batterie: come è ben visibile in figura 2.3.5 il SOC del modello Simulink tende progressivamente a distaccarsi dal profilo ottenuto tramite Matlab e a raggiungere addirittura valori negativi, non fisici.

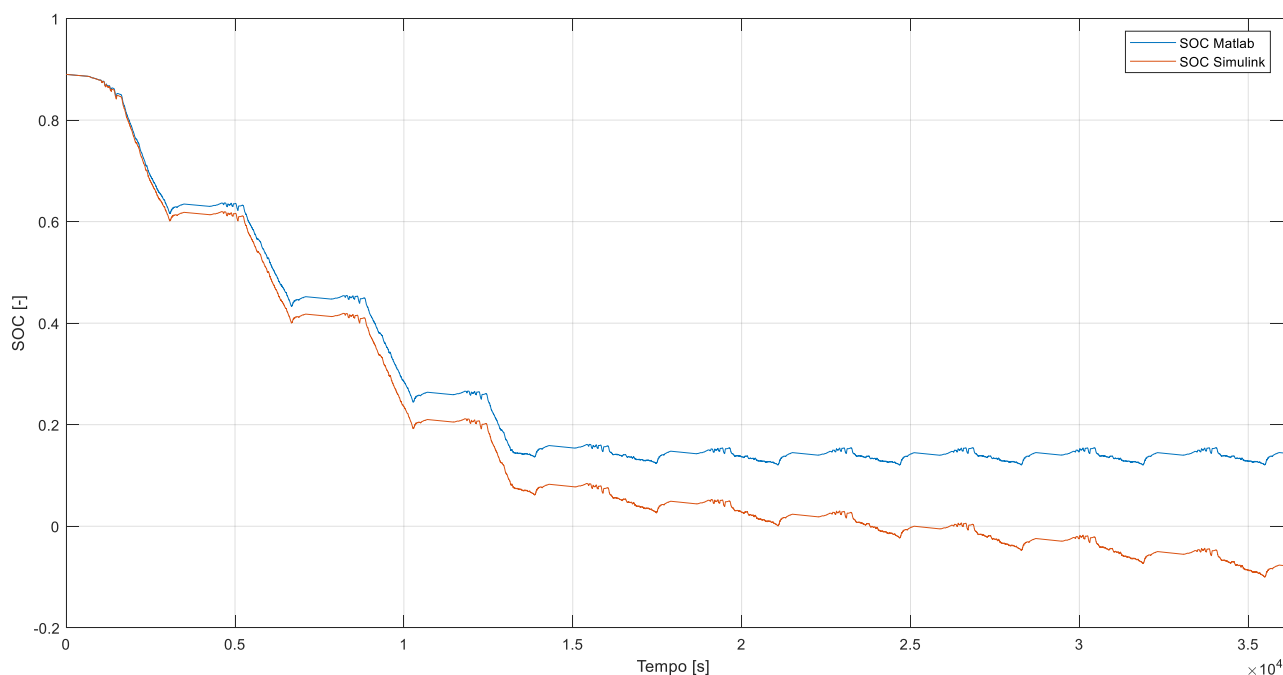


Figura 2.3.5: Andamento dei profili di SOC sul ciclo CARB-Heavyduty.

Le discrepanze sin qui emerse sono evidentemente da attribuirsi da un lato alla presenza di un *driver* nel modello Simulink che, come accennato in precedenza, non segue in maniera pedissequa il profilo di velocità di riferimento e dall'altro alla differente tipologia di interpolatori ed integratori presenti in grande numero nel modello. Va infatti ricordato che tutte le mappe utili al suo funzionamento sono ivi implementate sotto forma di *look-up tables* multidimensionali dotate di interpolatori. Il modello di batteria costituisce poi l'ultimo componente nel *loop* di funzionamento del modello e quivi convergono pressoché tutti i segnali precedentemente enumerati, ciascuno con le proprie piccole discrepanze, dando così un effetto cumulato. E' poi evidente che, funzionando in *open-loop*, il modello non può porre freno alla deriva dello SOC attuando una diversa modalità di funzionamento della *fuel-cell* ma

continua ad operarla come se l'effettivo andamento fosse quello riportato in blu nella figura soprastante.

Come si era inoltre descritto, lo SOC viene impiegato per la determinazione tramite mappe bidimensionali del valore della resistenza interna della batteria e della sua tensione elettrica di circuito aperto. L'andamento arancione in figura 2.3.5 determina quindi una deriva in tali profili. Si riporta in figura 2.3.6 a titolo d'esempio il confronto tra l'andamento della resistenza interna del pacco batterie ottenuto mediante Matlab e quello ottenuto mediante il modello Simulink.

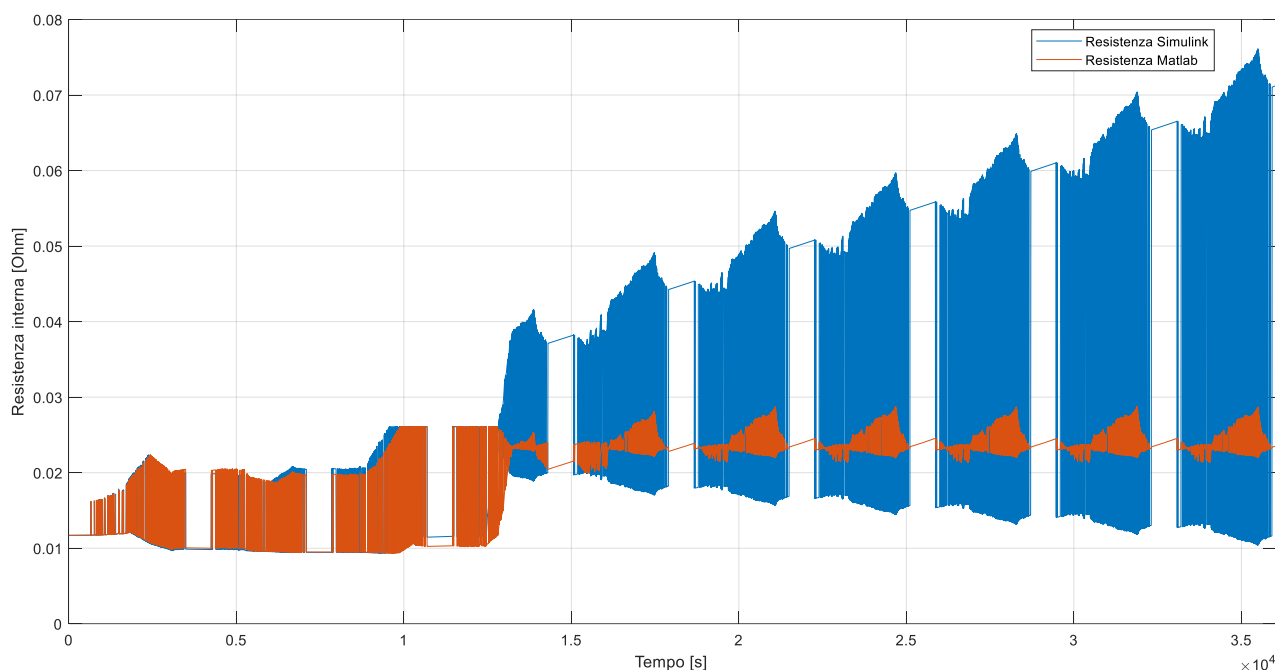


Figura 2.3.6: Andamento della resistenza interna della batteria su ciclo CARB-Heavyduty.

Un altro aspetto di rilevanza è dato dal *timestep* di calcolo che il solutore impiega nella simulazione. In particolare, lo *script* Matlab impiega un *timestep* fisso e pari ad 1s mentre i risultati del modello Simulink sin qui esposti sono stati determinati impiegando un solutore con *timestep* variabile secondo scelte operate in maniera automatica dal *software* stesso. Si è quindi provveduto ad effettuare un'analisi dell'effetto del *timestep* nel modello funzionante in *open-loop* sul ciclo CARB-Heavyduty, i cui risultati sono riportati nelle figure 2.3.7 e 2.3.8. Come si può ben notare da figura 2.3.7, il *timestep* ha un'influenza determinante sull'andamento dei profili di SOC. In particolare, utilizzando in Simulink un *timestep* fisso e pari ad 1s lo SOC assume addirittura un comportamento del tipo *charge-sustaining*: ciò è attribuibile a problemi di convergenza numerica. Riducendo progressivamente il valore del *timestep* il profilo del SOC tende progressivamente ad avvicinarsi al profilo in blu elettrico rappresentante il risultato della simulazione tramite *script* Matlab, senza però mai arrivare ad una convergenza totale. In figura 2.3.8, invece, si riporta un grafico di tipo riassuntivo in cui da un lato è rilevabile l'effetto del *timestep* sul valore di SOC finale al termine del ciclo guida e dall'altro sul tempo di simulazione impiegato. Come si può notare, raffinando il *timestep* il valore di SOC finale tende progressivamente a decrescere, seppur con una decrescita meno marcata oltre valori pari a 0.5s. In secondo luogo il tempo di simulazione tende a crescere in maniera pressoché esponenziale. A seguito dell'analisi qui presentata si è stabilito innanzitutto di uniformare il solutore tra Matlab e Simulink utilizzandone uno a *timestep* fisso e inoltre di utilizzare il medesimo valore

impiegato in Matlab e cioè 1s. Ciò è in particolare dovuto alla necessità di effettuare dei confronti tra i risultati delle simulazioni svolte impiegando il modello Simulink ed il comportamento della *Dynamic Programming*, che è fatta operare tramite un algoritmo in ambiente Matlab e richiede un costo computazionale assai elevato per essere valutata con *timesteps* inferiori ad 1s.

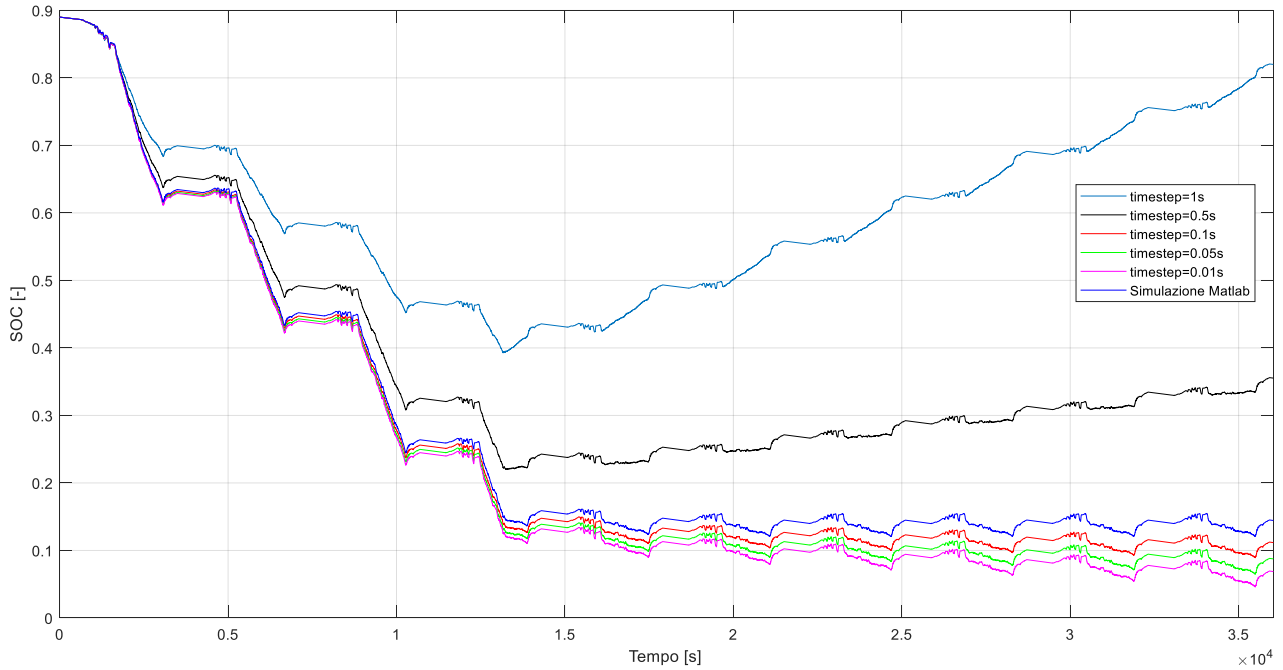


Figura 2.3.7: Effetto del *timestep* sui profili di SOC ricavati dal modello in *open-loop* su ciclo CARB-Heavyduty.

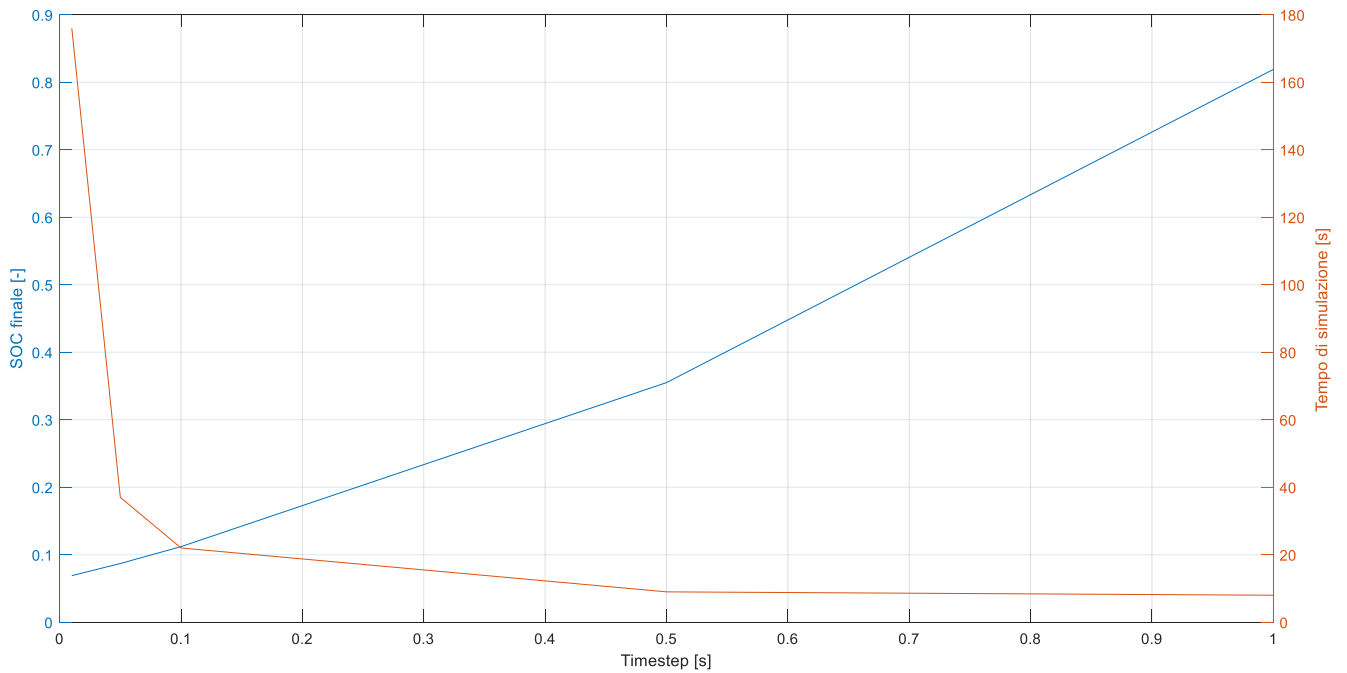


Figura 2.3.8: Effetto del *timestep* sul valore di SOC finale e sul tempo di simulazione per il modello Simulink in *open-loop* su ciclo CARB-Heavyduty.

Come si vedrà nei successivi capitoli, il confronto con la DP sarà assai utile per stabilire la bontà o meno del comportamento della strategia *Map-based* implementata nel modello Simulink.

Un'ulteriore riprova sulle cause poc'anzi attribuite alle discrepanze tra i risultati della simulazione in Matlab e del modello Simulink si è ottenuta implementando la medesima strategia di controllo presente nello *script* e descritta nelle pagine precedenti all'interno del modello Simulink, rendendolo così funzionante in *closed-loop*. Similmente a quanto descritto per la strategia *Map-based* al paragrafo 2.2, la CS *rule-based* in esame è stata realizzata utilizzando il *tool* Stateflow. La simulazione per le analisi seguenti ha impiegato, come già citato, un solutore a step temporale fisso e pari ad 1s. Analogamente al caso in *open-loop* il *driver* segue efficientemente il profilo del ciclo guida e nella prima parte del *loop* di calcolo del modello Simulink non si hanno discrepanze evidenti se non alcune di scarsa rilevanza ed imputabili, come in precedenza, alla presenza di un *driver*. A titolo d'esempio basti osservare il particolare del profilo delle forze di resistenza all'avanzamento del veicolo riportato in figura 2.3.9.

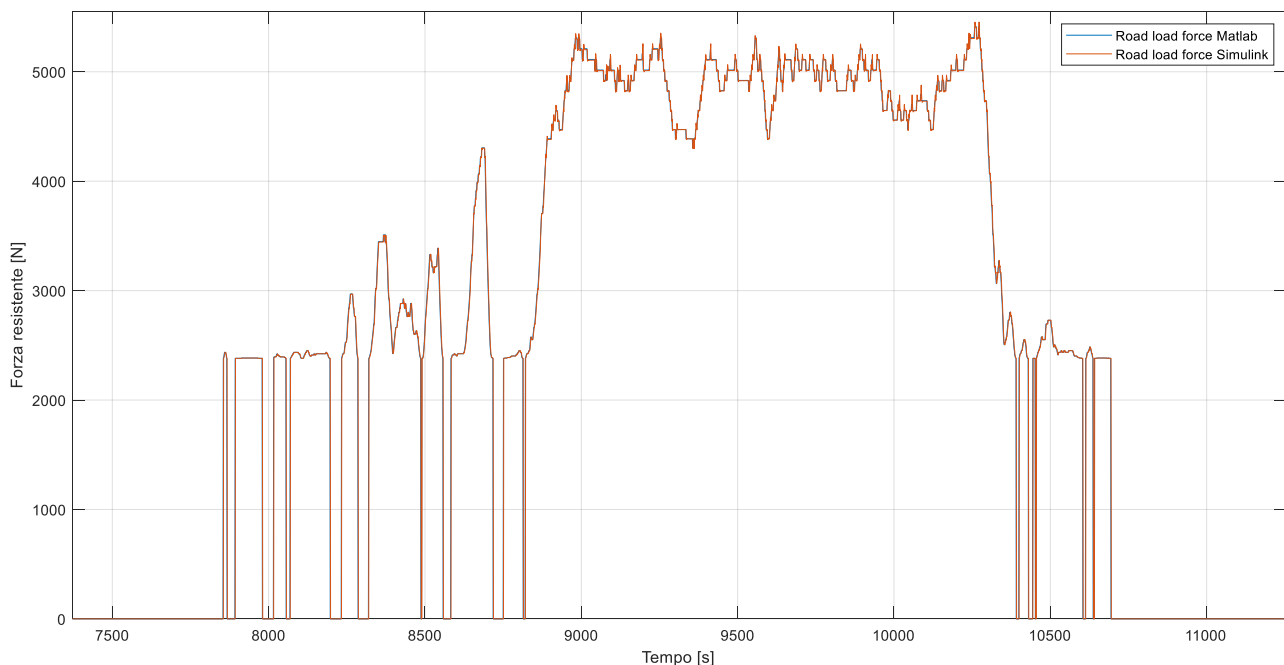


Figura 2.3.9: Particolare del profilo delle forze di resistenza all'avanzamento del veicolo su ciclo CARB-Haevy duty per il modello in *closed-loop*.

Nel caso del modello funzionante in *closed-loop* l'analisi delle perdite relative al motore elettrico di trazione mette in luce delle differenze addirittura più marcate rispetto a quanto avveniva per il modello in *open-loop*, come si può ben notare in figura 2.3.10. Analogamente al caso in *open-loop* si è provveduto ad integrare nel tempo i due segnali riportati in figura 2.3.10, ottenendo i risultati esposti in tabella 2.3.2. Come si può facilmente calcolare, il valore di perdita cumulato dato dal modello Simulink è inferiore dello 0.85% rispetto a quanto ottenuto tramite Matlab, per cui sebbene in figura 2.3.10 siano presenti alcuni punti a perdita assai elevata, il loro effetto cumulato non è rilevante. Il valore delle perdite risultanti dal modello Simulink è inoltre diminuito rispetto al caso operante in *open-loop*.

Tabella 2.3.1. Risultati dell'integrazione nel tempo dei segnali di perdita del motore elettrico.

Segnale	Valore perdita
Matlab	$25.97 * 10^7 J$
Simulink	$25.75 * 10^7 J$

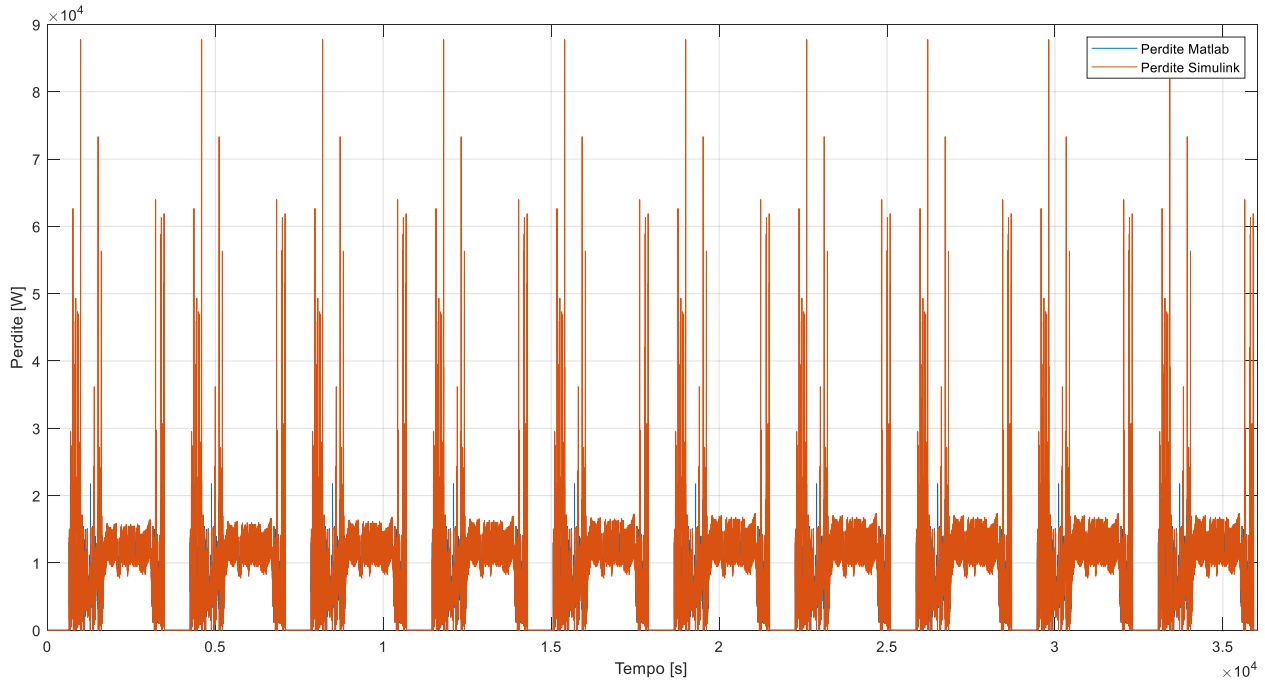


Figura 2.3.10: Andamento delle perdite del motore elettrico su ciclo CARB-Heavyduty per il modello funzionante in *closed-loop*.

Si riporta invece in figura 2.3.11 il confronto tra i profili di SOC per le tre condizioni sin qui esaminate, ovvero simulazione in ambiente Matlab, modello in *open-loop* con *timestep* fisso pari ad 1s e modello in *closed-loop* con analogo *timestep*. Come si può notare, la deriva in ambito *charge-sustaining* che caratterizzava il profilo di SOC ottenuto mediante il modello funzionante in *open-loop* non è più presente nel caso del modello operante in *closed-loop*. Nonostante ciò, permangono delle evidenti discrepanze rispetto al caso della simulazione Matlab. Il valore di SOC alla fine del ciclo guida è decisamente più simile anche rispetto al caso analizzato in figura 2.3.5. Fino ad un tempo di simulazione pari a circa 18000s le simulazioni via Matlab e in *closed-loop* mostrano delle diversità più marcate rispetto all'ultima parte del ciclo guida e, poiché la strategia *rule-based* qui impiegata opera le proprie decisioni esclusivamente in base allo SOC, anche i profili di potenza richiesti alla FC sono evidentemente differenti. Ciò è chiaramente ravvisabile in figura 2.3.12. Analoghe diversità permangono anche per quanto concerne i parametri caratteristici della batteria come la resistenza interna e la tensione elettrica di corto circuito, sebbene come si può notare dall'analisi delle figure 2.3.6 e 2.3.13 le differenze nel caso della simulazione in *closed-loop* siano di minore entità rispetto al caso in *open-loop*.

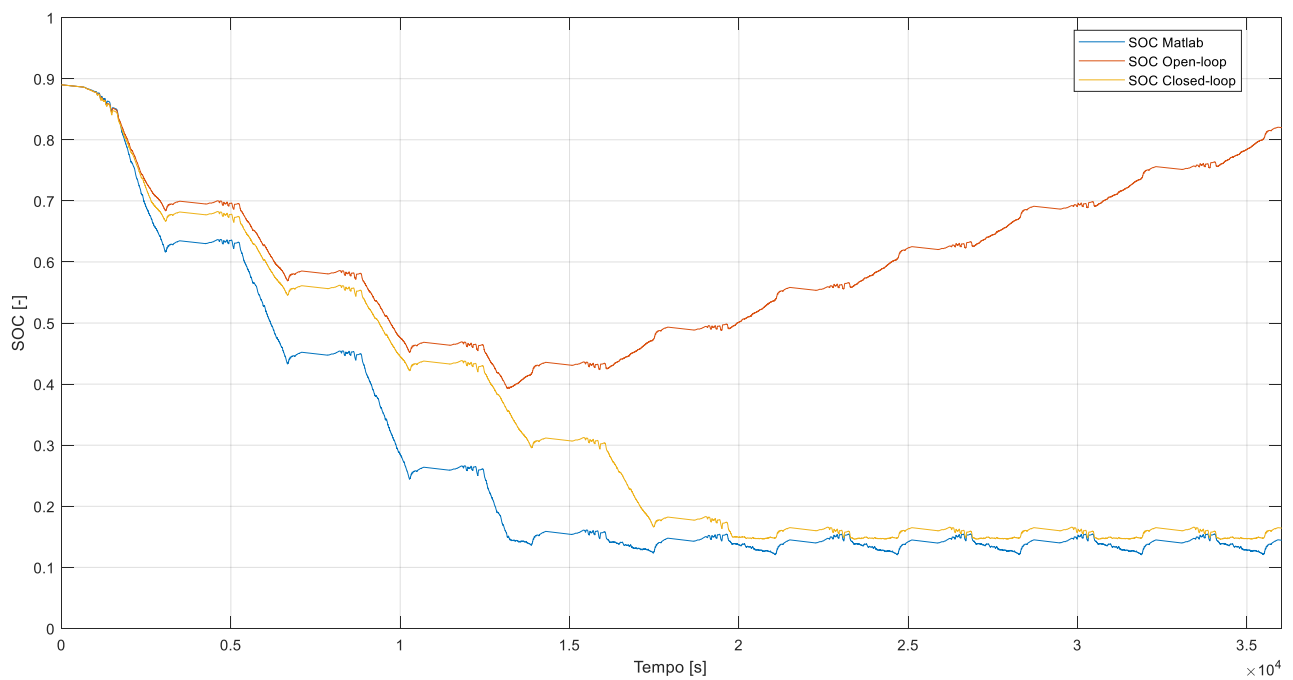


Figura 2.3.11: Confronto tra profili di SOC su ciclo CARB-Haevy duty.

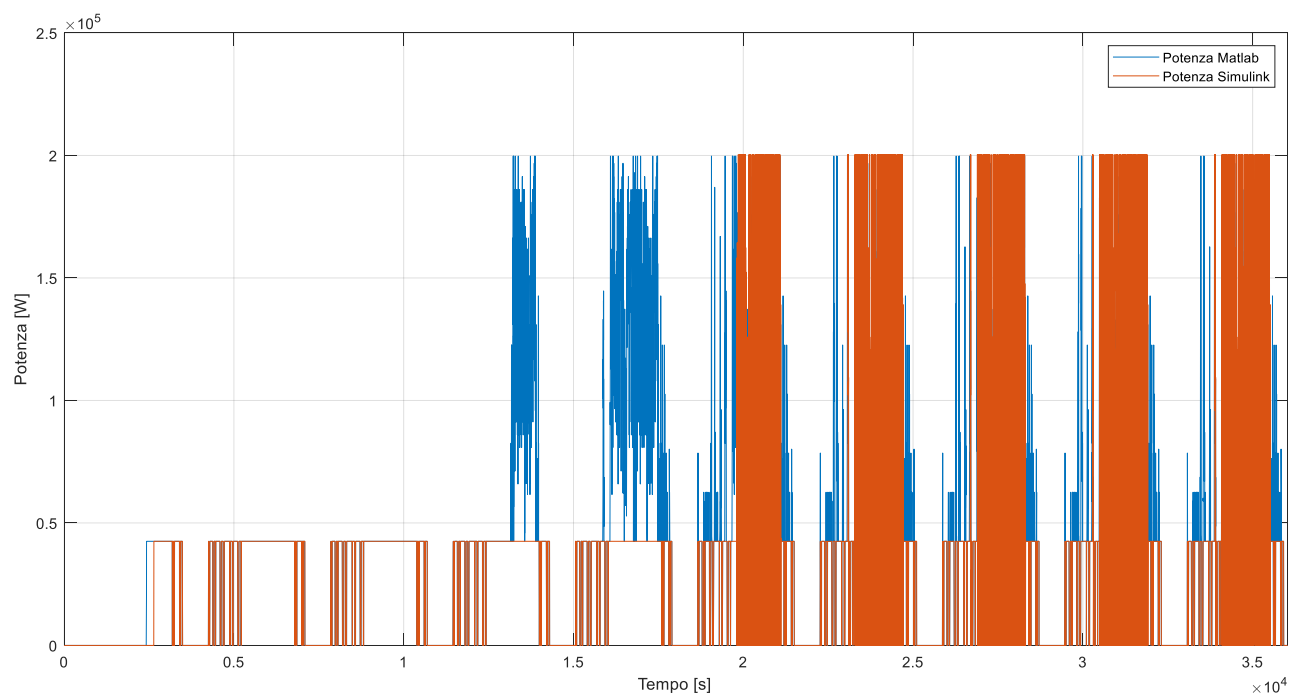


Figura 2.3.12: Confronto tra profili di potenza richiesta alla *fuel-cell* su ciclo CARB-Heavyduty con modello Simulink funzionante in *closed-loop*.

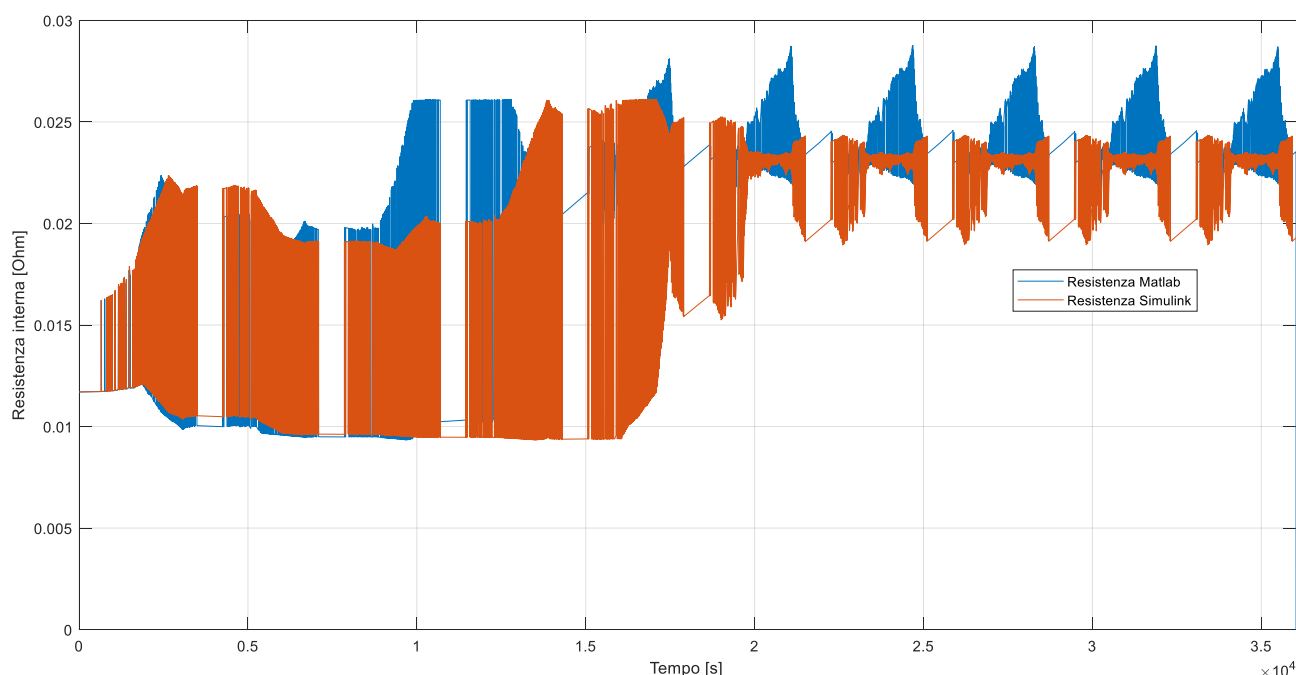


Figura 2.3.13: Confronto tra profili di resistenza interna della batteria su ciclo CARB-Heavyduty con modello Simulink funzionante in *closed-loop*.

Come si è precedentemente accennato, il permanere delle discrepanze tra il modello Simulink e la simulazione Matlab nonostante l'implementazione della medesima strategia di controllo conferma le ipotesi in merito alle cause di tali diversità precedentemente esposte. La presenza di un *driver*, di diversi interpolatori ed integratori tra i due *software* ne implica cioè l'esistenza. I risultati ottenuti tramite il modello Simulink possono inoltre essere ritenuti più realistici rispetto a quanto emerge dalla semplice simulazione via *script* Matlab dato il maggiore livello di dettaglio del modello qui realizzato.

2.4 – Cicli guida utilizzati per le simulazioni

Al fine di simulare il comportamento del modello Simulink di veicolo FCHEV dotato della strategia di controllo *Map-Based* (MB) individuata in letteratura e quivi implementata, è stato necessario individuare alcuni cicli guida appropriati rispetto alla tipologia di veicolo in esame. Il primo di questi è rappresentato dal ciclo denominato “CARB-Heavyduty” già citato più volte nei paragrafi precedenti. Il profilo di velocità richiesta che lo caratterizza è riportato in figura 2.4.1. Tale ciclo è caratterizzato da una lunghezza di 41.3km e non è corredato da un profilo di pendenza del terreno. Come si può osservare in figura 2.4.1, esso è sostanzialmente costituito da quattro fasi. Fino a 1008s si ha un primo tratto urbano con valori di velocità bassi, successivamente e fino a 1614s si ha un secondo tratto con frequenti transitori ma a valori di velocità decisamente più alti. Sino a 3185s si ha poi un tratto extraurbano-autostradale in cui si raggiungono i massimi valori di velocità lungo il ciclo guida, con un picco di 95km/h pur con la presenza di numerosi transitori di limitata ampiezza. La missione guida si conclude con un'ultima fase urbana caratterizzata da transitori e da valori di velocità non elevati.

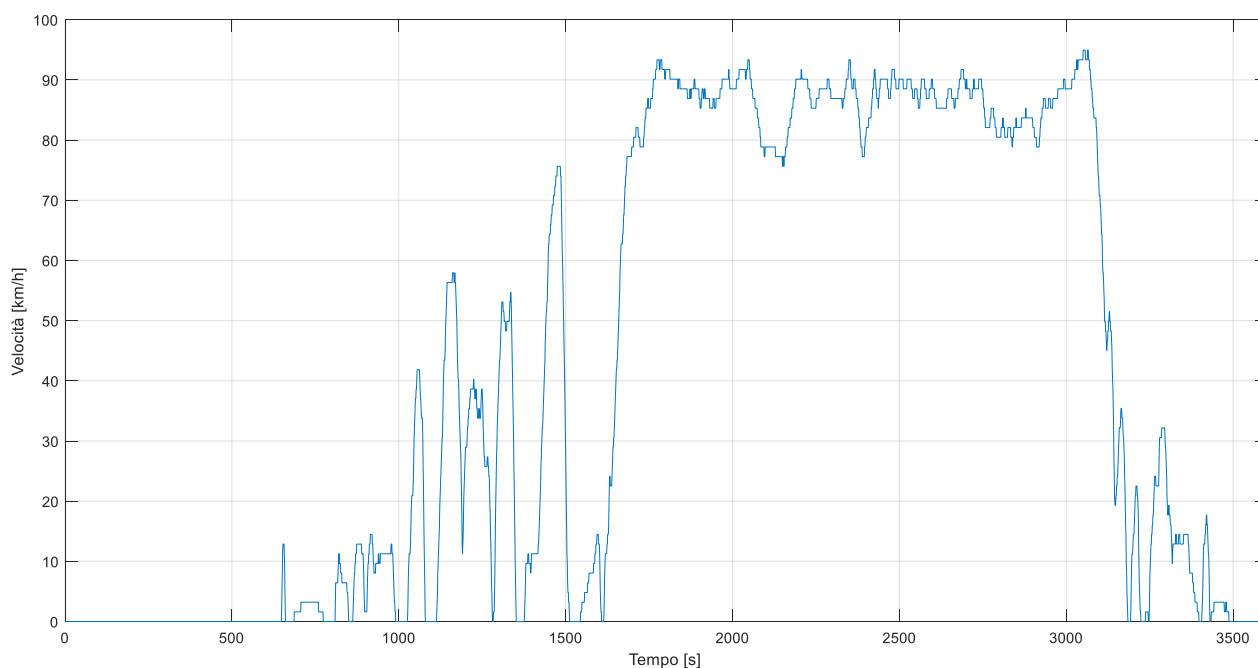


Figura 2.4.1: Velocità *target* del ciclo guida CARB-Heavyduty.

Il profilo di velocità nella figura soprastante è stato poi concatenato per dieci volte al fine di ottenere un ciclo guida di lunghezza maggiore e pari a 413km.

Per ottenere ulteriori cicli guida si è poi impiegato un *software* denominato VECTO. Tale programma è rinvenibile sul sito della *European Commission* e, allo stato attuale, è volto alla simulazione delle emissioni di CO₂ da parte di veicoli di tipo HD e caratterizzati da *powertrains* convenzionali. Nonostante l'evidente differenza di destinazione in termini di tipologia di veicolo, tale *software* è stato assai utile per ricavare dei profili di velocità di riferimento corredati dalla pendenza del terreno, in modo da effettuare delle simulazioni con dei profili di forze di resistenza all'avanzamento del veicolo più realistici. Il primo dei cicli così ricavati è denominato "Long Hawl Drivecycle" e ne si riporta in figura 2.4.2 il profilo di velocità di riferimento e la pendenza del terreno in gradi. Come si può ben intuire, si simula qui una missione guida di tipo extraurbano-autostradale della lunghezza di 100km, in cui i transitori non sono particolarmente frequenti e i valori di velocità sono in media elevati. Sono rintracciabili già alcune importanti differenze rispetto al profilo di velocità riportato in figura 2.4.1. Nel ciclo Long Hawl, infatti, si hanno lunghi tratti a velocità costante non particolarmente realistici ed inoltre vengono richieste accelerazioni al veicolo decisamente importanti. Si noti, ad esempio, come all'inizio del ciclo venga richiesto al veicolo di accelerare da 0km/h ad 83km/h in circa 2s. Tali considerazioni hanno portato allo svolgimento di analisi che saranno descritte nell'ultima parte del presente paragrafo.

Un altro ciclo guida così estrapolato è rappresentato dall'"Urban Delivery Drivecycle", i cui profili di velocità richiesta e pendenza del terreno sono riportati in figura 2.4.3. Come si può osservare, si tratta di una missione guida decisamente differente rispetto a quanto richiesto dal Long Hawl Drivecycle. A valle di un iniziale tratto ad alta velocità, è qui infatti simulata una consegna in ambito urbano con frequenti e ripetitivi transitori, caratterizzati da velocità di picco in genere non superiori ai 65km/h. Il ciclo ha una lunghezza complessiva di 25km.

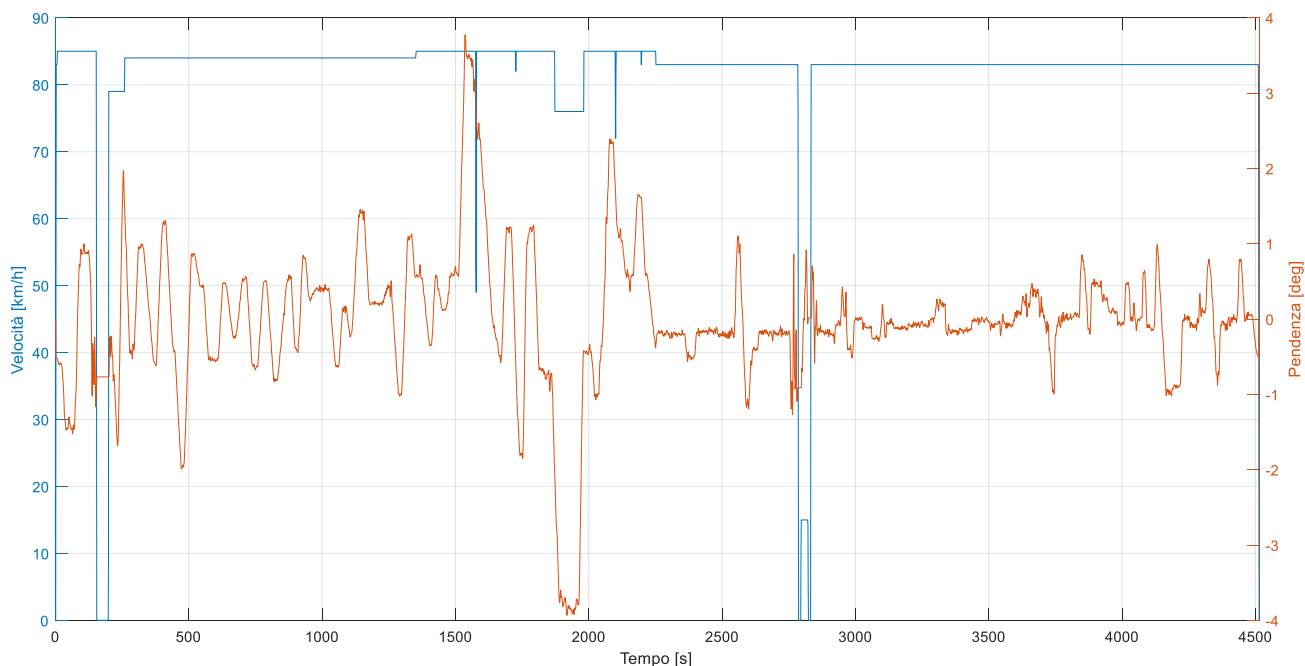


Figura 2.4.2: Profilo di velocità e pendenza del ciclo guida Long Haul Drivecycle.

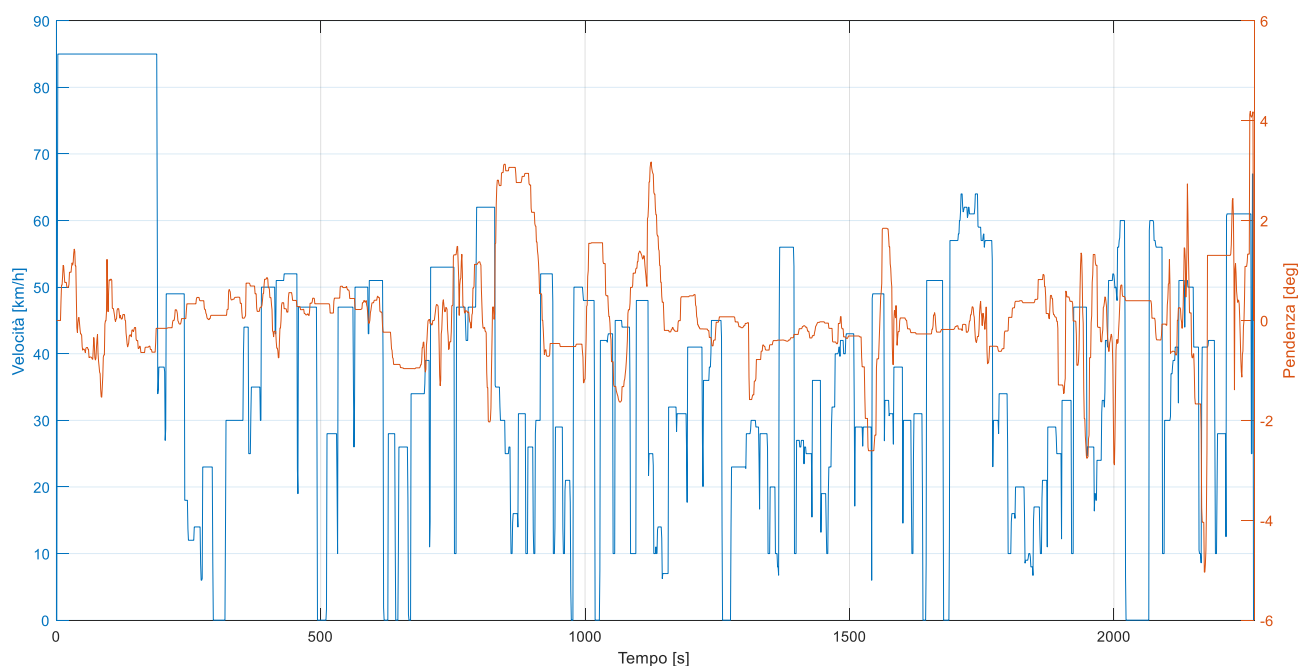


Figura 2.4.3: Profilo di velocità e pendenza del ciclo guida Urban Delivery Drivecycle.

Un ulteriore ciclo guida ricavato tramite l'utilizzo del *software* VECTO è il “Regional Delivery Drivecycle”, i cui profili di velocità richiesta e pendenza sono riportati in figura 2.4.4. Come si può notare, il ciclo guida considerato si configura come una via intermedia tra i due profili guida precedentemente esposti. Fino a 440s è infatti presente un tratto urbano con velocità medie non elevate e frequenti transitori, successivamente e fino a 2285s è presente un secondo tratto caratterizzato nuovamente dalla presenza di transitori ma a valori di velocità decisamente più elevati. Sino a 5209s è poi presente un tratto extraurbano/autostradale in cui, pur con presenza di qualche transitorio, si raggiungono i valori di velocità maggiori lungo il ciclo guida.

E' poi presente una sosta di poco più di 300s seguita da un ultimo tratto assai simile a quello presente in apertura del ciclo guida. La missione così caratterizzata ha una lunghezza complessiva di 100km.

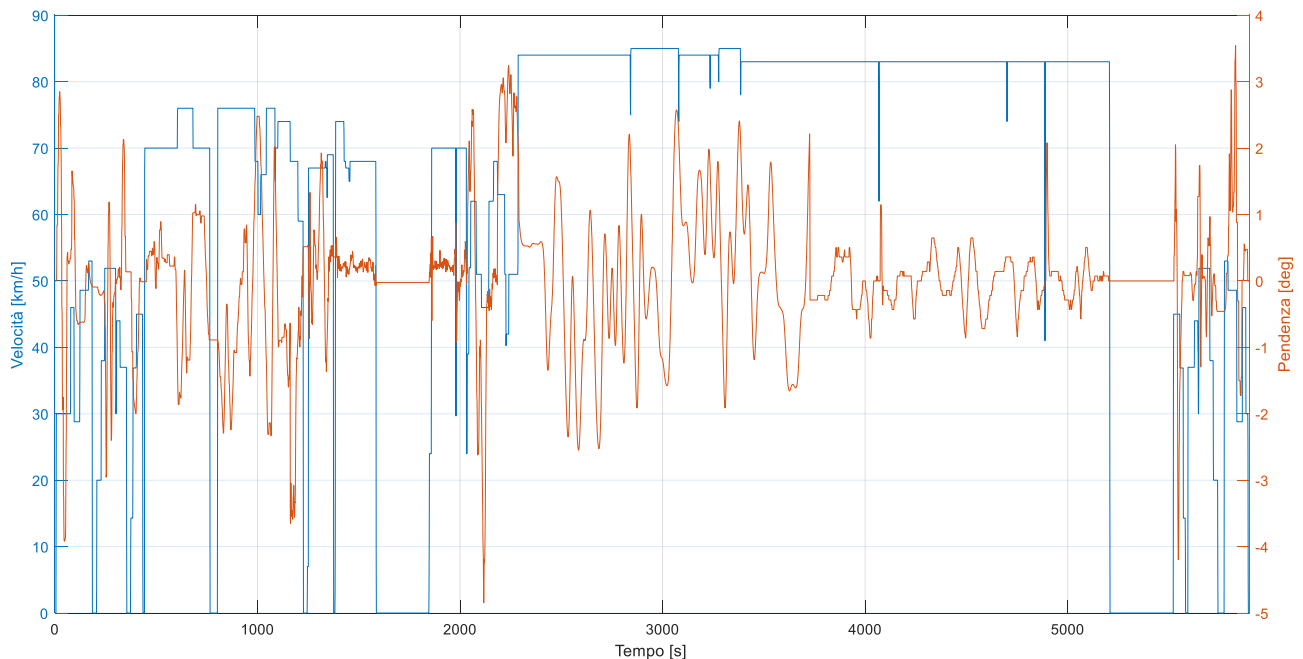


Figura 2.4.4: Profilo di velocità e pendenza del ciclo guida Regional Delivery Drivecycle.

Al fine di ottenere delle missioni guida più realistiche e rappresentative della tipologia di profilo di velocità richiesto al veicolo esaminato nel presente lavoro di tesi, si è pensato di concatenare i tre cicli ricavati utilizzando VECTO in modo da formare due cicli guida distinti e così costituiti:

- Ciclo Urban Delivery + Ciclo Long Haul + Ciclo Urban Delivery;
- Ciclo Regional Delivery + Ciclo Urban Delivery;

Si riporta in figura 2.4.5 il profilo di velocità richiesta del primo dei due cicli appena citati, al quale per comodità si farà da ora riferimento con il nome “Urban+LongHaul+Urban”. Come si può intuire, si simula qui una consegna tra due luoghi separati da un tratto autostradale e raggiungibili rispettivamente attraversando dei tratti urbani. Si riporta invece in figura 2.4.6 il secondo dei cicli sopra descritti, al quale per comodità si farà da ora riferimento con il nome “Regional+Urban”. Come si nota, è qui simulata una missione guida in cui, a valle di un tratto extraurbano con anche una sezione autostradale, il veicolo debba attraversare un tratto urbano per completare il proprio percorso.

E' ora utile accennare ad alcune analisi che sono state effettuate e che hanno portato ad un'ulteriore modifica dei profili dei cicli guida riportati nelle figure 2.4.5 e 2.4.6. Si era infatti già notato come non solo i profili guida ricavati da VECTO avessero una forma costituita essenzialmente da irrealistici tratti a velocità costante ma come fossero caratterizzati da accelerazioni richieste al veicolo di importante entità. In particolare, confrontando i profili di accelerazione dei cicli Urban+LongHaul+Urban e Regional+Urban con il profilo di accelerazione tipico del ciclo CARB-Heavyduty si sono ottenuti i risultati riportati nelle figure 2.4.7 e 2.4.8. In particolare, per ottenere un confronto su una durata simile, si sono qui concatenati tre cicli del tipo CARB-Heavyduty.

Come è possibile notare in figura 2.4.7, il valore di picco dell'accelerazione del ciclo CARB-Heavyduty è pari a $1.35m/s^2$ mentre per il ciclo Urban+LongHawl+Urban è pari a $19.41m/s^2$. Pur tenendo conto del fatto che il ciclo qui considerato possa essere decisamente più dinamico rispetto al CARB-Heavyduty, i valori di accelerazione richiesti non sono assolutamente né realizzabili dal veicolo considerato nel presente lavoro di tesi né realistici per un *truck* di questa tipologia.

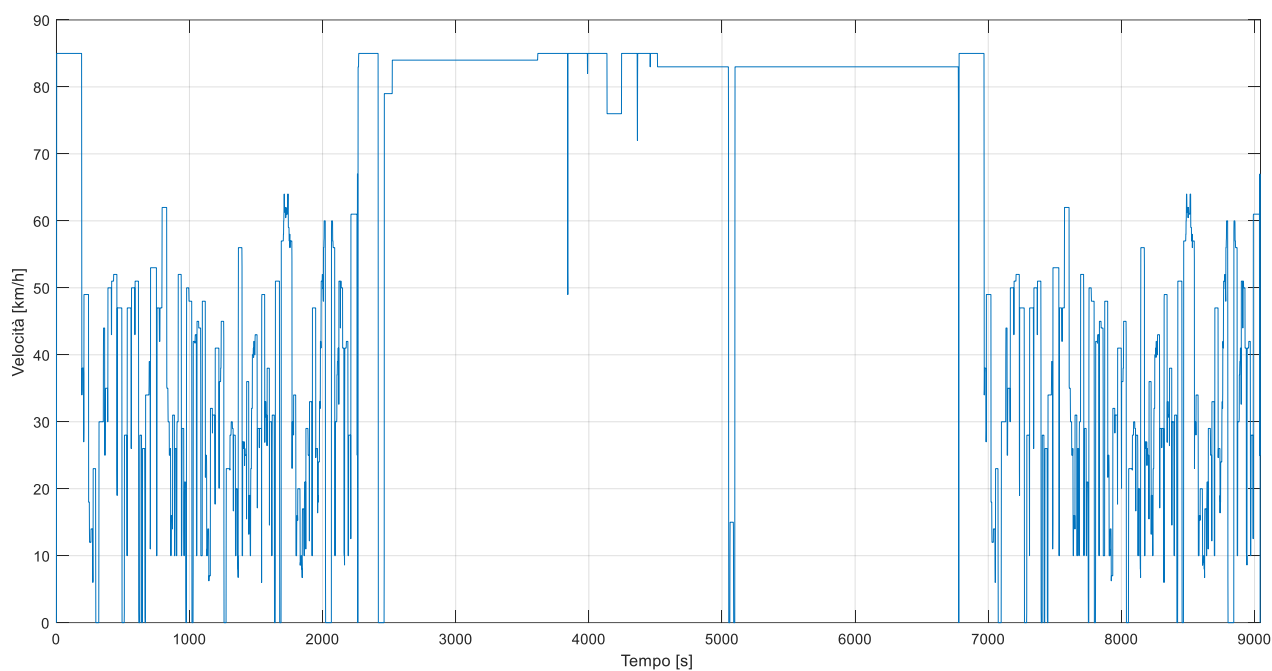


Figura 2.4.5: Profilo di velocità del ciclo guida Urban+LongHawl+Urban.

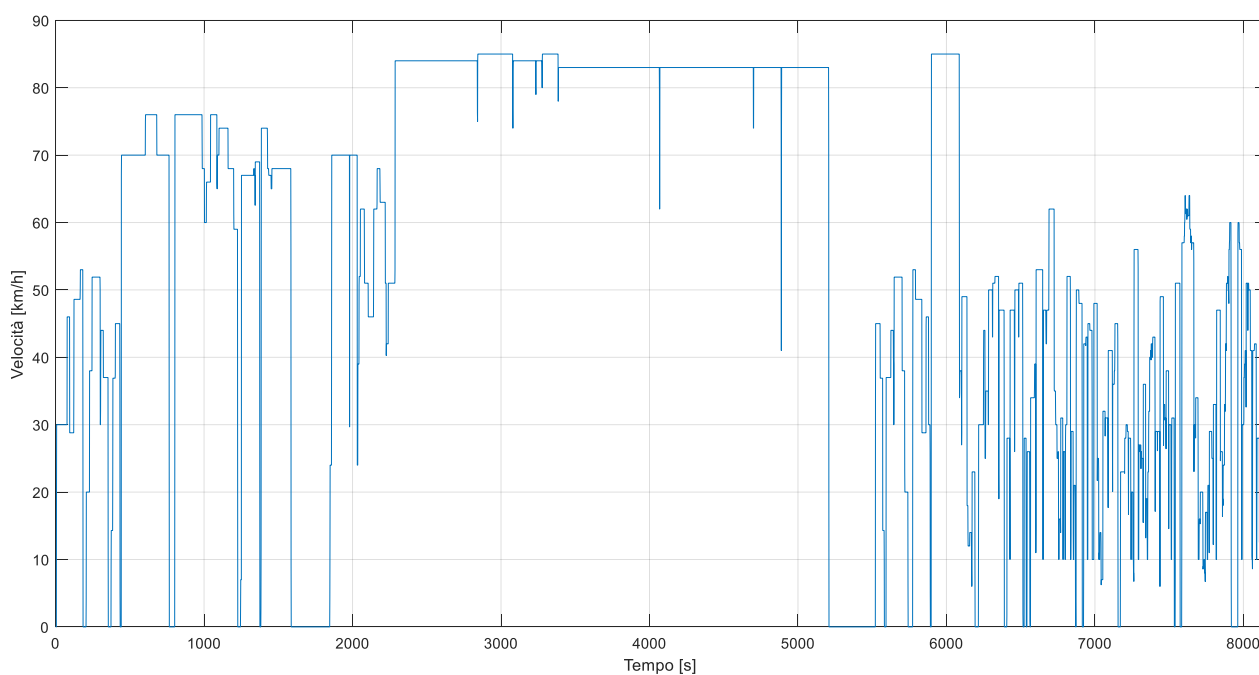


Figura 2.4.6: Profilo di velocità del ciclo Regional+Urban.

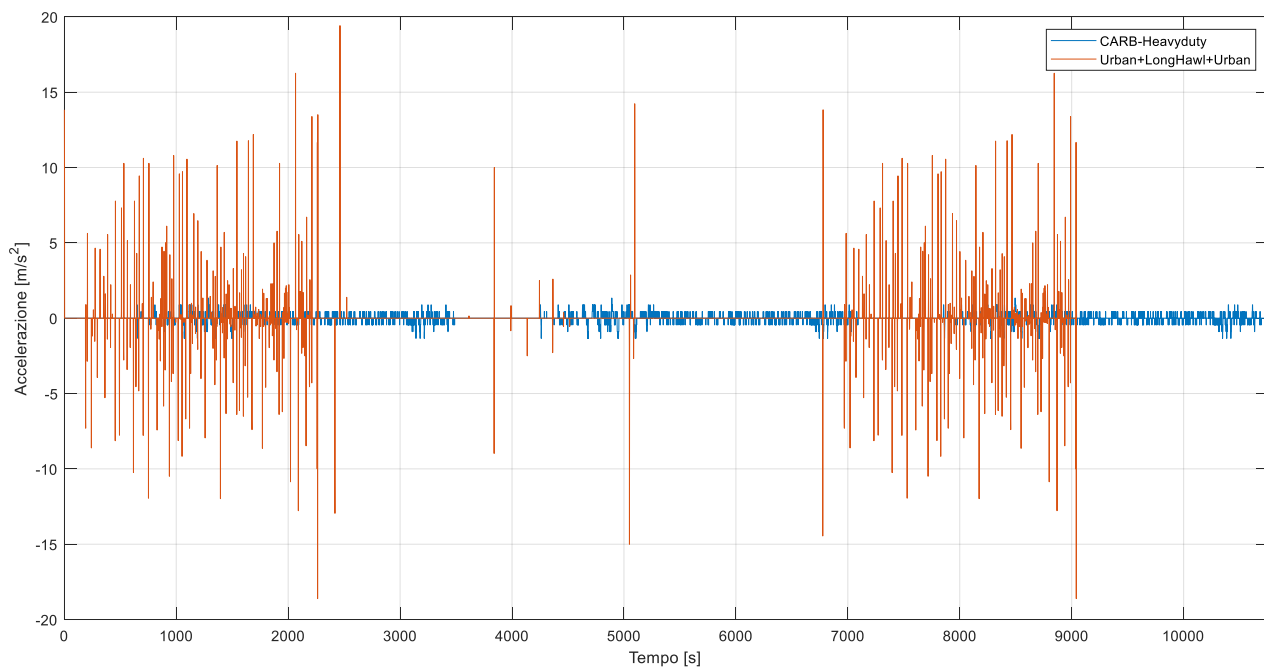


Figura 2.4.7: Confronto tra i profili di accelerazione richiesta dei cicli CARB-Heavyduty e Urban+LongHaul+Urban.

Si possono effettuare considerazioni analoghe per il caso del ciclo Regional+Urban riportato in figura 2.4.8, con la differenza che qui il picco di accelerazione richiesta è pari a $18.62 m/s^2$ e, come è evidente, il ciclo guida è meno dinamico rispetto al caso Urban+LongHaul+Urban.

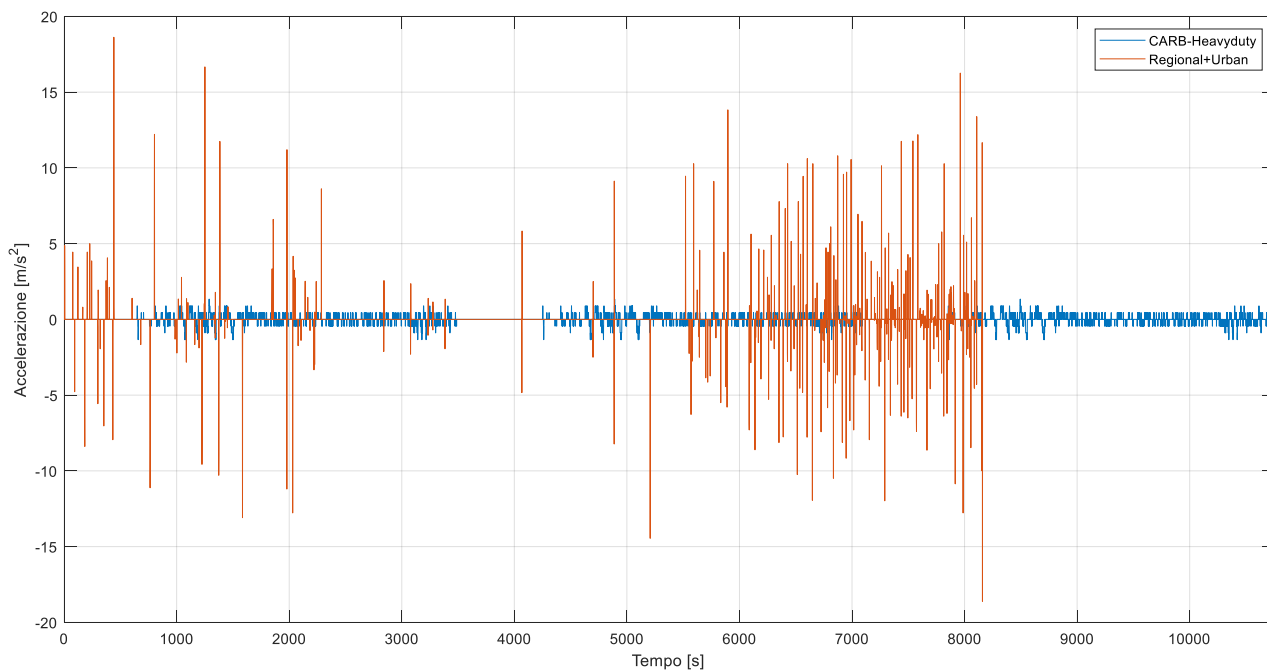


Figura 2.4.8: Confronto tra i profili di accelerazione richiesta dei cicli CARB-Heavyduty e Regional+Urban.

Alla luce delle problematiche appena esposte si è effettuato un filtraggio in ambiente Matlab dei profili di accelerazione riportati nelle figure soprastanti tenendo conto dei limiti di coppia del motore elettrico di trazione, ottenendo così dei profili di velocità più realistici e consoni agli scopi del presente lavoro. In particolare si riportano nelle figure 2.4.9 e 2.4.10 i profili di velocità e accelerazione a monte e a valle del filtraggio, per il ciclo Urban+LongHawl+Urban.

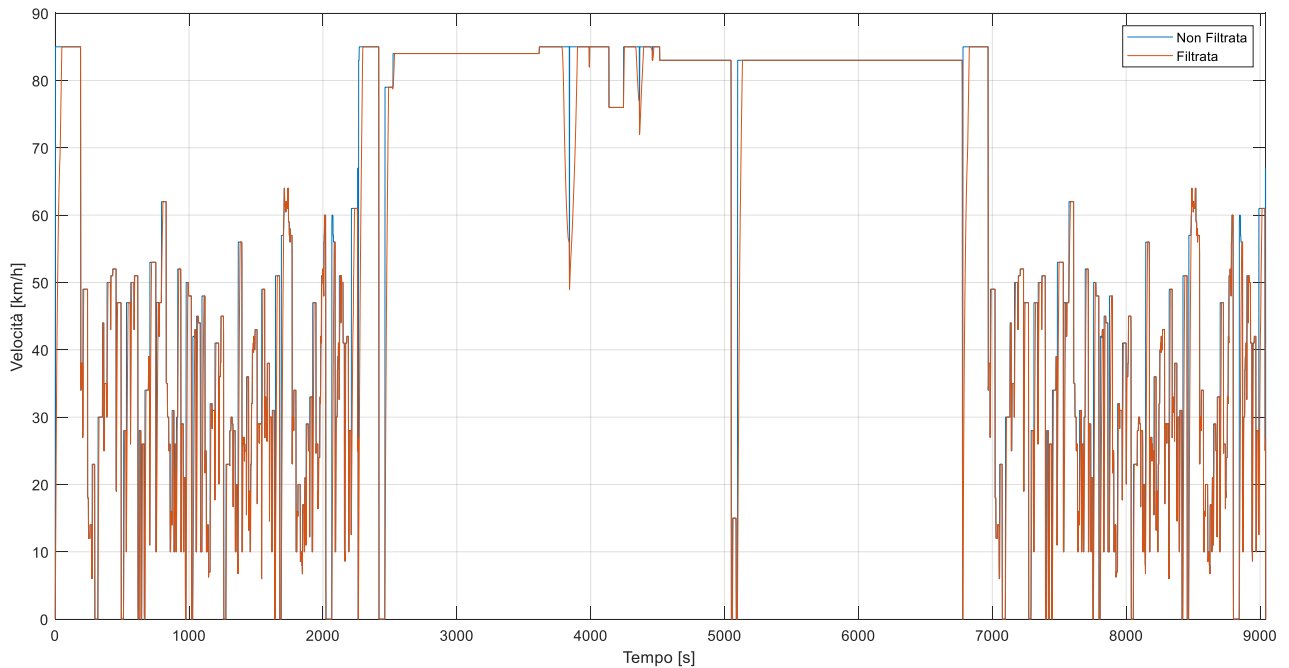


Figura 2.4.9: Profilo di velocità filtrato ed originario del ciclo guida Urban+LongHawl+Urban.

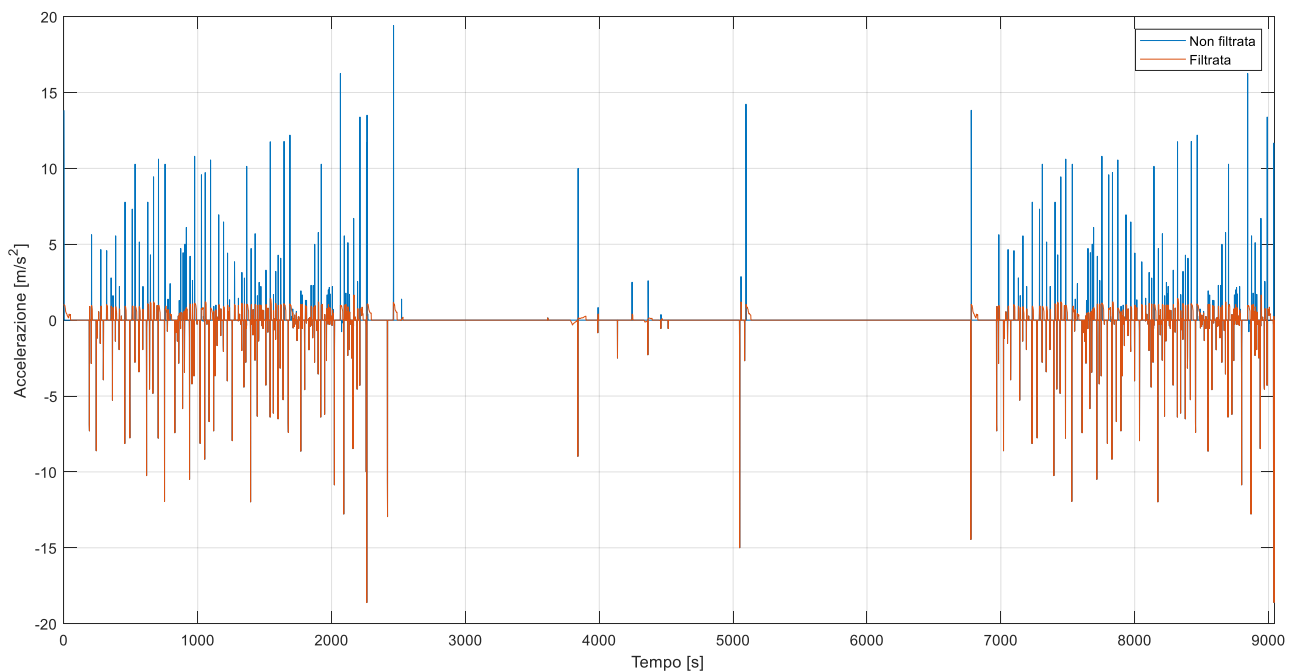


Figura 2.4.10: Profilo di accelerazione filtrato ed originario del ciclo guida Urban+LongHawl+Urban.

Come si può notare da figura 2.4.10 non si è limitata l'accelerazione nell'ambito della frenata in quanto, come descritto nel paragrafo relativo alla realizzazione del modello Simulink, si è prevista la presenza di freni idraulici in aggiunta alla capacità frenante data dal motore elettrico.

Si riportano nelle figure 2.4.11 e 2.4.12 le medesime analisi per quanto concerne il ciclo Regional+Urban.

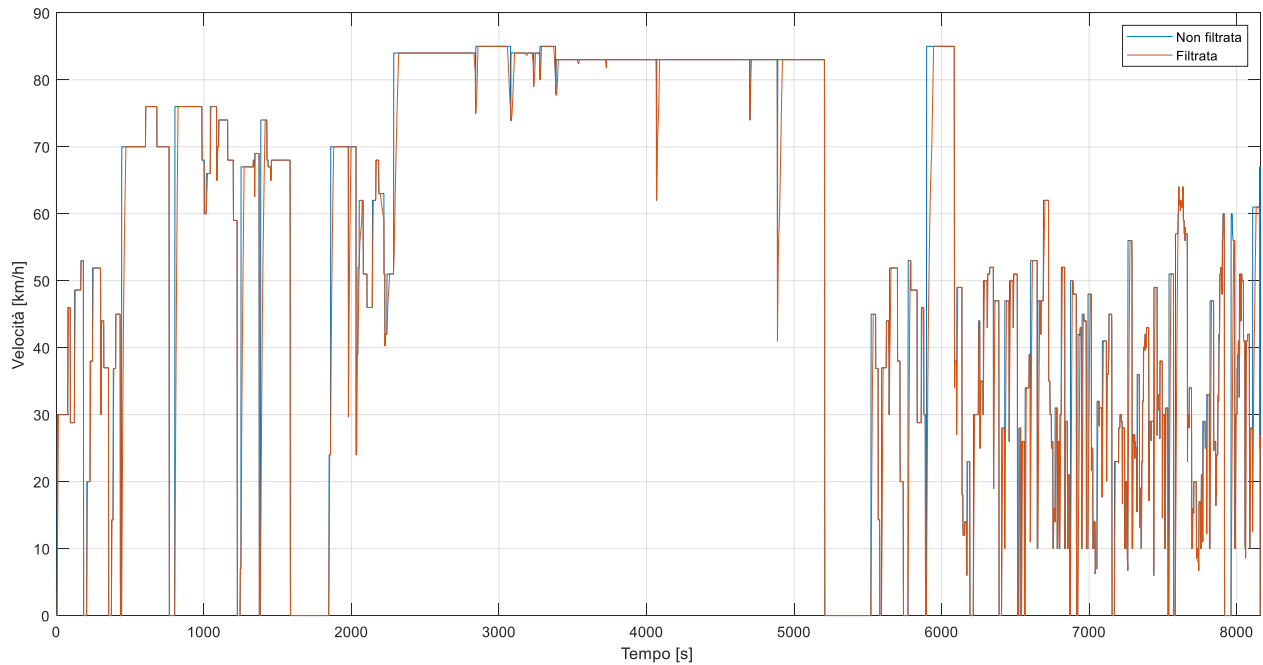


Figura 2.4.11: Profilo di velocità filtrato ed originario del ciclo guida Regional+Urban.

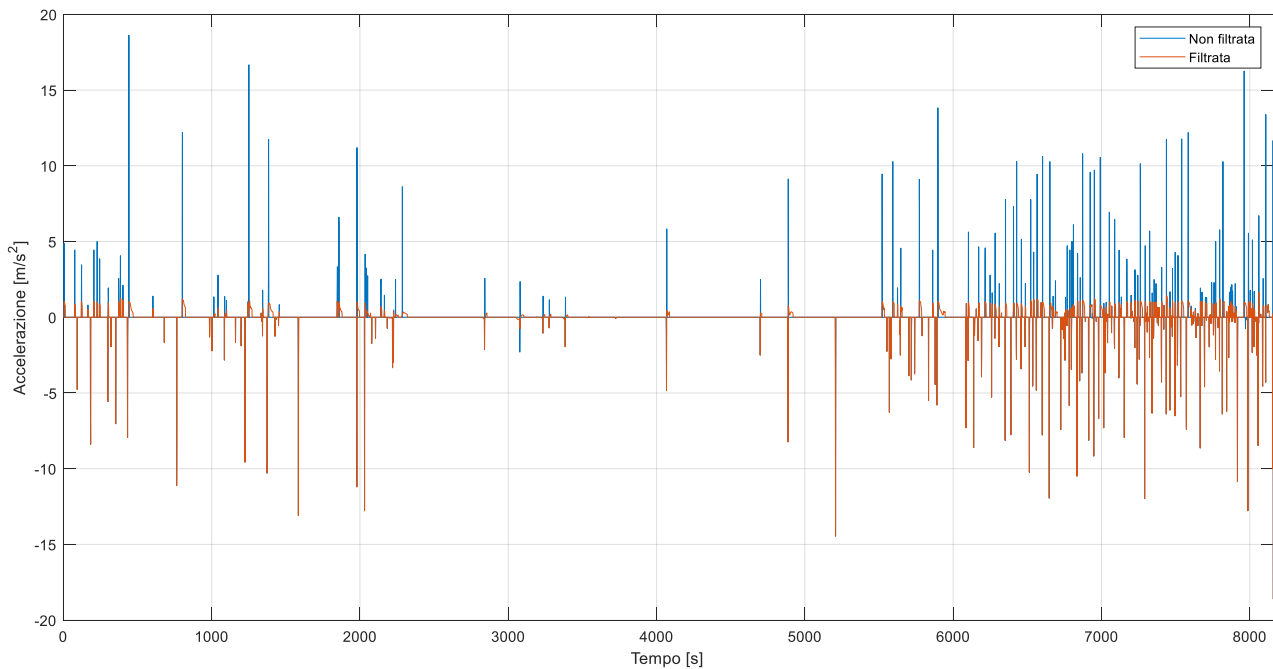


Figura 2.4.12: Profilo di accelerazione filtrato ed originario del ciclo guida Regional+Urban.

2.5 – Ottimizzazione della strategia di controllo mediante la Particle Swarm Optimization

Una volta realizzato il modello Simulink di veicolo FCHEV, implementata in esso la strategia di controllo e realizzati i cicli guida descritti nel paragrafo 2.4 si è resa necessaria un’ottimizzazione dei parametri costitutivi della strategia di controllo selezionata. Infatti la CS descritta in [4] ed implementata nella versione delineata al paragrafo 2.2 era stata originariamente concepita per un veicolo di tipo *passenger-car* la cui *fuel-cell stack* aveva una potenza massima di 15kW (mentre il veicolo HD qui considerato è dotato di una FC con potenza massima pari a 200kW) ed il cui *powertrain* prevedeva anche la presenza di un supercondensatore. Oltre alle evidenti differenze appena citate è bene notare che la strategia originaria era stata ottimizzata su quattro cicli guida non afferenti all’ambito *heavy-duty*, in particolare essi erano il *New European Driving Cycle* (NEDC), lo *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS), il *Federal Test Procedure 75* (FTP-75) e lo *Highway Fuel Economy Test Cycle* (HWFET).

Con riferimento alla figura 2.2.1, i parametri da ottimizzare sono i seguenti:

- livello di potenza $P_{fcs,lo}$;
- livello di potenza $P_{fcs,hi}$;
- livello di potenza $P_{fcs,max}$;
- livello di SOC SOC_{lo} ;
- livello di SOC SOC_{hi} ;
- livello di SOC SOC_{max} .

Come livello di SOC minimo SOC_{min} si è scelto invece un valore pari a 0.05 in quanto si tratta del minimo SOC per cui si può effettuare l’interpolazione sulle mappe bidimensionali presenti nel sottosistema della batteria descritto al paragrafo 2.1. L’obiettivo dell’ottimizzazione è chiaramente il rinvenimento della migliore “sestina” dei parametri sopra citati che consenta di minimizzare la funzione di costo riportata nell’equazione 2.5.1.

$$H2_{med} = \frac{(H2consumption_{CARB} + H2consumption_{LongHawl} + H2consumption_{Regional})}{3} \quad (2.5.1)$$

Come si può notare tale funzione di costo $H2_{med}$ rappresenta la media aritmetica dei consumi di idrogeno espressi in kg ogni cento km sui tre cicli guida selezionati per le simulazioni e descritti al paragrafo 2.4. E’ importante citare come, a monte dell’ottimizzazione, si sia condotta un’analisi relativa ai comportamenti della DP sui tre cicli menzionati (i quali verranno esposti nei prossimi capitoli) per verificare se fosse possibile individuare in essi un qualche comportamento comune inscrivibile in una regola. Tale analisi non ha però portato ad alcun risultato e non si ritiene quindi utile riportare in questa sede il dettaglio di dette considerazioni. L’ottimizzazione dei sei parametri caratteristici su tre cicli guida ha rappresentato un problema relativamente complesso per cui non era assolutamente immaginabile di procedere manualmente con un approccio *trial and error* e si è quindi stabilito di fare ricorso ad un algoritmo di ottimizzazione denominato *Particle Swarm Optimization* (PSO). Tale algoritmo è stato per la prima volta introdotto da J.Kennedy e R.C.Eberhart nel 1995 per descrivere il comportamento sociale di gruppi di animali e successivamente è stato da loro stessi rivisto nell’ambito dell’ottimizzazione di problemi complessi. Esso opera nel seguente modo: si genera

una colonia di particelle randomica detta *swarm* che nel caso specifico rappresenta un insieme di sestine dei parametri caratteristici della strategia di controllo. Ogni particella ha una definita posizione nell'ambito dello spazio di ricerca ovvero lo spazio delle possibili soluzioni al problema di ottimizzazione ma anche una propria velocità che ne descrive il movimento in termini di direzione e distanza. Ciascuna particella non solo interagisce con le altre presenti nella colonia ma ha anche memoria della propria posizione migliore rilevata nelle iterazioni in relazione alla funzione obbiettivo. Lo "sciame" di particelle ha anche coscienza dell'ottimo globale raggiunto. Ad ogni iterazione la posizione e velocità di ciascuna particella vengono aggiornate tenendo conto della propria velocità nonché da un lato della migliore posizione personale e dall'altro della migliore posizione globale rilevata. Mediante svariate iterazioni le particelle possono così cooperare al fine di individuare la migliore soluzione a livello globale. Si riporta qui l'equazione 2.5.2 tramite la quale si aggiorna la posizione di ciascuna particella e l'equazione 2.5.3 mediante la quale si calcola la velocità della particella alla successiva iterazione.

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (2.5.2)$$

$$v_i(t + 1) = w * v_i(t) + c_1 * (p_i(t) - x_i(t)) + c_2 * (g(t) - x_i(t)) \quad (2.5.3)$$

In 2.5.2 $x_i(t)$ rappresenta il vettore posizione dell' i -esima particella all'istante temporale (o iterazione) t mentre $v_i(t)$ rappresenta il vettore velocità della medesima particella al medesimo *timestep*. In 2.5.3 invece w, c_1, c_2 sono dei coefficienti reali, $p_i(t)$ rappresenta la migliore soluzione incontrata dall' i -esima particella sino all'istante t mentre $g(t)$ è la migliore soluzione globale rilevata sino all'istante t . Di fatto è poi possibile scomporre l'equazione della velocità 2.5.3 nelle componenti j -esime del moto secondo l'equazione 2.5.4.

$$v_{ij}(t + 1) = w * v_{ij}(t) + r_1 * c_1 * (p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + r_2 * c_2 * (g_j(t) - x_{ij}(t)) \quad (2.5.4)$$

In essa r_1 è un numero distribuito casualmente tra 0 e 1, c_1 è il coefficiente di accelerazione, r_2 è un ulteriore numero distribuito casualmente tra 0 e 1, c_2 è un secondo coefficiente di accelerazione mentre $g_j(t)$ rappresenta la componente j -esima della posizione del *global best* all'istante t . Il primo termine del secondo membro dell'equazione 2.5.4 è detto termine d'inerzia ed il coefficiente w precedentemente citato è il coefficiente d'inerzia, il secondo termine è detto componente cognitiva della velocità mentre il terzo termine è detto componente sociale della velocità.

Come si può notare, il modello matematico alla base della PSO è assai semplice ma tale algoritmo è caratterizzato da una notevole potenza nella risoluzione di problemi di ottimizzazione.

Nel caso specifico del presente lavoro si è utilizzato uno *script* Matlab rintracciato in [17] adattandolo alle necessità specifiche. In particolare si è costruita in ambiente Matlab la funzione di costo operando in modo da lanciare direttamente la simulazione mediante modello Simulink e variando di volta in volta il ciclo guida impiegato in maniera del tutto automatica. Dato che, come si è visto, la strategia di controllo presenta dei parametri caratteristici con delle posizioni ben definite nell'ambito della mappa di funzionamento si è anche fatto in modo che la PSO possa evitare in maniera automatica soluzioni impossibili, come ad esempio una particella in

cui si abbia un $SOC_{hi} > SOC_{max}$, o che portino a degli errori nella simulazione dati per esempio da un valore di $SOC < 0.05$, ecc. Si sono svolti vari tentativi del tipo *trial and error* per comprendere l'effetto dato da una variazione del numero di particelle e del numero di iterazioni sul risultato finale della PSO. Nel seguito del presente paragrafo, per non appesantire eccessivamente la trattazione, si riporteranno solo alcuni esempi tratti da quest'analisi. In particolare è bene considerare dapprima la mappa nella versione originale presente nell'articolo scientifico [4], riportata in figura 2.5.1.

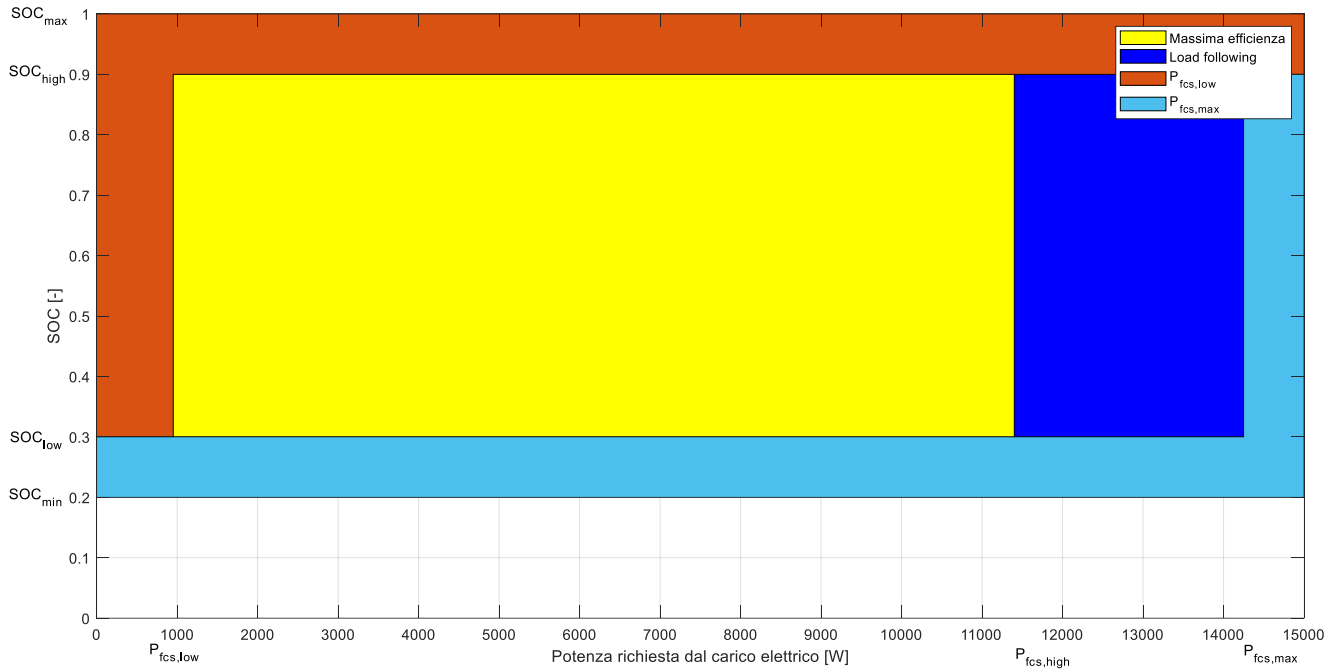


Figura 2.5.1: Mappa della strategia MB nella versione originaria presente in [4].

Per il dettaglio sui valori dei vari parametri qui presenti si rimanda alla tabella 2.2.1. Utilizzando un'ottimizzazione basata su 20 iterazioni e 150 particelle di popolazione si è invece ottenuta la mappa presente in figura 2.5.2. Come si può facilmente notare, tale mappa risulta decisamente differente rispetto a quella riportata in figura 2.5.1 in quanto le zone gialla e blu in cui si opera la FC rispettivamente al punto di massima efficienza e in modalità *load following* sono caratterizzate da una banda di SOC la cui ampiezza è estremamente limitata. Si riporta anche in figura 2.5.3 l'andamento in termini di *best cost* ovvero di miglior costo globale sulla popolazione di particelle ottenuto in ciascuna iterazione. Come si può notare, durante le prime iterazioni tale costo non compare in quanto le particelle considerate, per come erano costituite, hanno causato degli errori nella simulazione. Con il progredire dell'ottimizzazione il consumo d'Idrogeno determinato dalle possibili soluzioni al problema di ottimizzazione è via via diminuito sino ad un valore finale di 7.63kg ogni 100km. Aumentando il numero di iterazioni a 50 e mantenendo la popolazione ad un valore di 150 particelle si è ottenuta la mappa riportata in figura 2.5.4. Come ben si può intuire tale mappa non è assolutamente plausibile in quanto la differenza tra i valori di SOC_{high} e SOC_{low} è di piccolissima entità. Inoltre, osservando l'andamento dei *best cost* riportato in figura 2.5.5 si può notare come il consumo finale sia addirittura leggermente superiore a quello ottenuto tramite la mappa riportata in figura 2.5.2. Si noti anche come nelle prime iterazioni il costo sia elevatissimo tanto da non poter essere riportato nei limiti del grafico in quanto le particelle scelte erano evidentemente caratterizzate da posizioni impossibili all'interno della mappa. Simili comportamenti sono pienamente

giustificati dal fatto che la popolazione di partenza nell'ottimizzazione è generata in maniera puramente casuale.

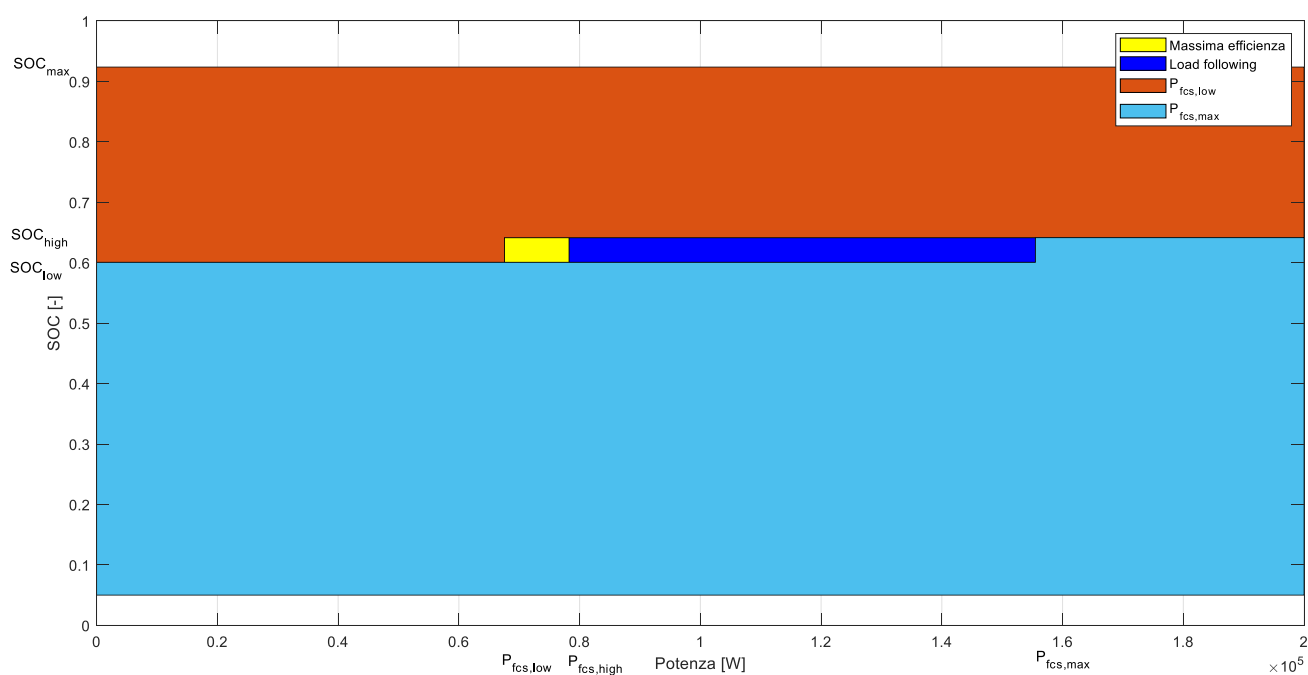


Figura 2.5.2: Mappa risultante dall'ottimizzazione con 20 iterazioni e popolazione di 150.

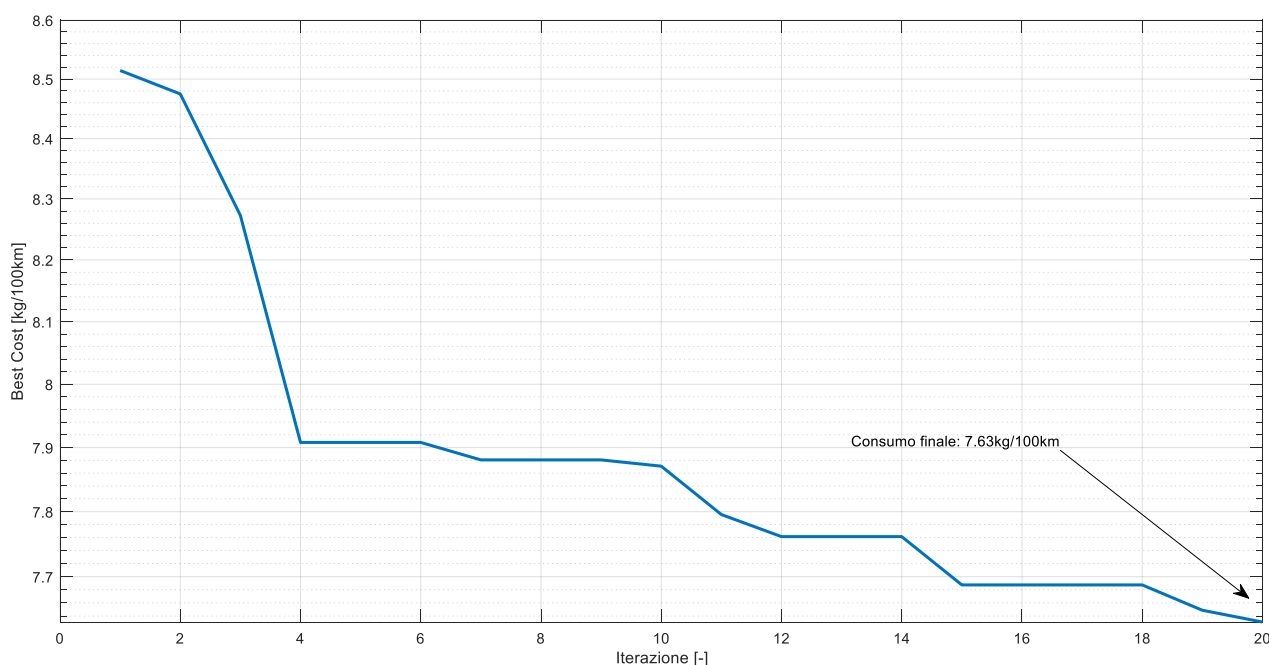


Figura 2.5.3: Andamento dei *best cost* nell'ottimizzazione con 20 iterazioni e 150 particelle.

L'ottimizzazione con 50 iterazioni e popolazione di 150 particelle ha richiesto per la sua esecuzione circa sei ore utilizzando un normale PC dotato di 8GB di RAM e processore Intel

CORE i7. Si è anche svolto un secondo tentativo di ottimizzazione con le medesime caratteristiche ottenendo una mappa differente e provando l'instabilità dell'ottimizzazione con i valori di iterazioni e popolazione scelti. La mappa così ottenuta è riportata in figura 2.5.6.

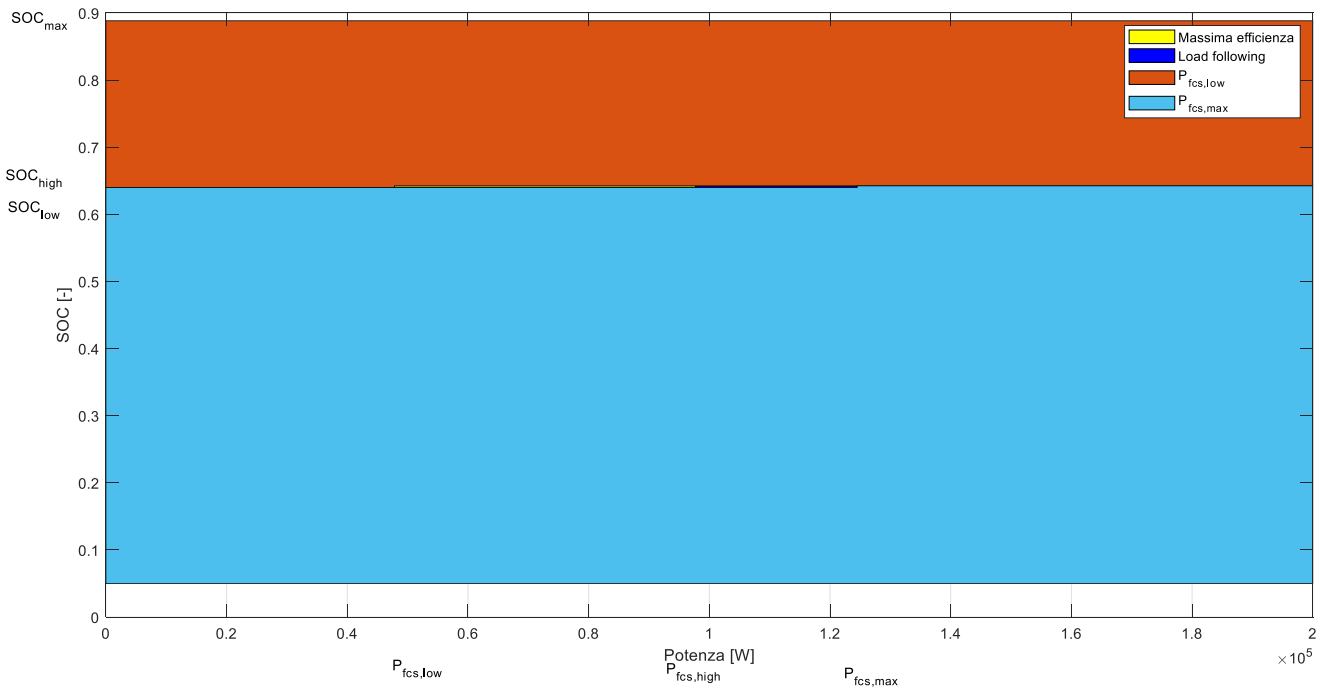


Figura 2.5.4: Mappa risultante dall'ottimizzazione con 50 iterazioni e popolazione di 150.

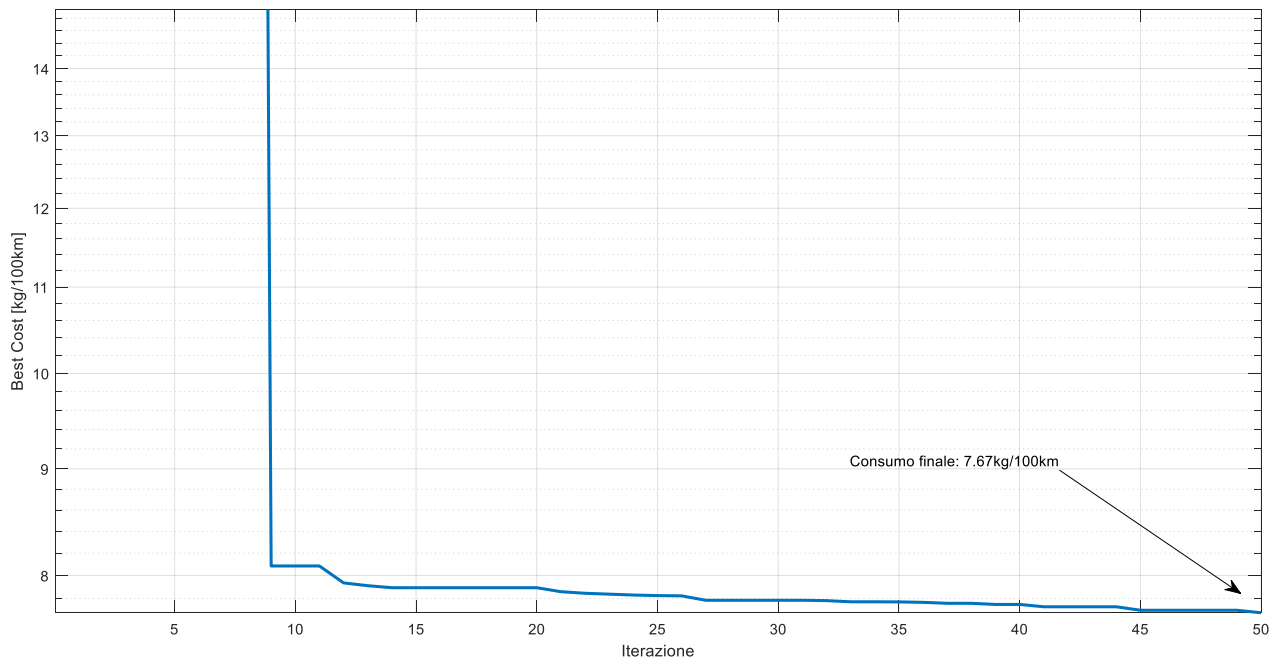


Figura 2.5.5: Andamento dei *best cost* nell'ottimizzazione con 50 iterazioni e 150 particelle.

Come si può intuire, la mappa riportata in figura 2.5.6 è decisamente più plausibile rispetto a quanto presente in figura 2.5.4. Il costo finale ottenuto mediante di essa è però ancora superiore e pari a 7.95kg di Idrogeno ogni 100km. Si è quindi optato per una variazione assai drastica del numero di particelle.

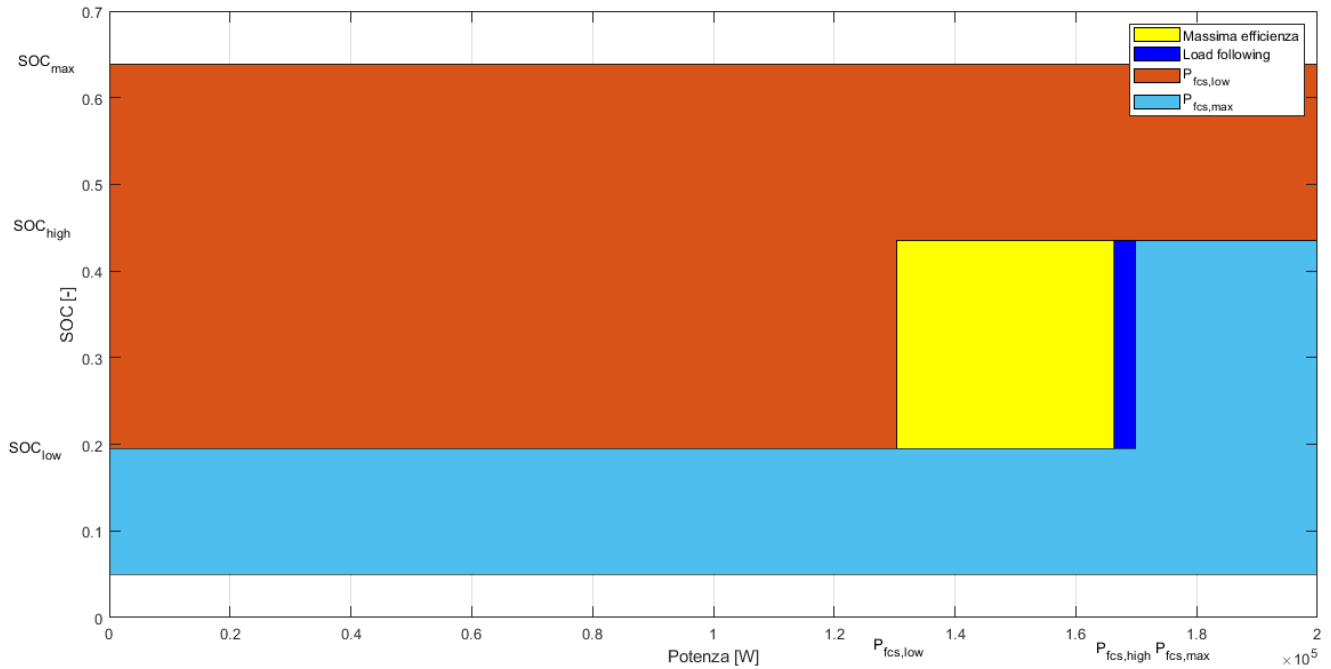


Figura 2.5.6: Mappa risultante dalla seconda ottimizzazione con 50 iterazioni e popolazione di 150.

Utilizzando un numero di iterazioni pari a 50 e una popolazione di 500 particelle si è così ottenuta la mappa riportata in figura 2.5.7.

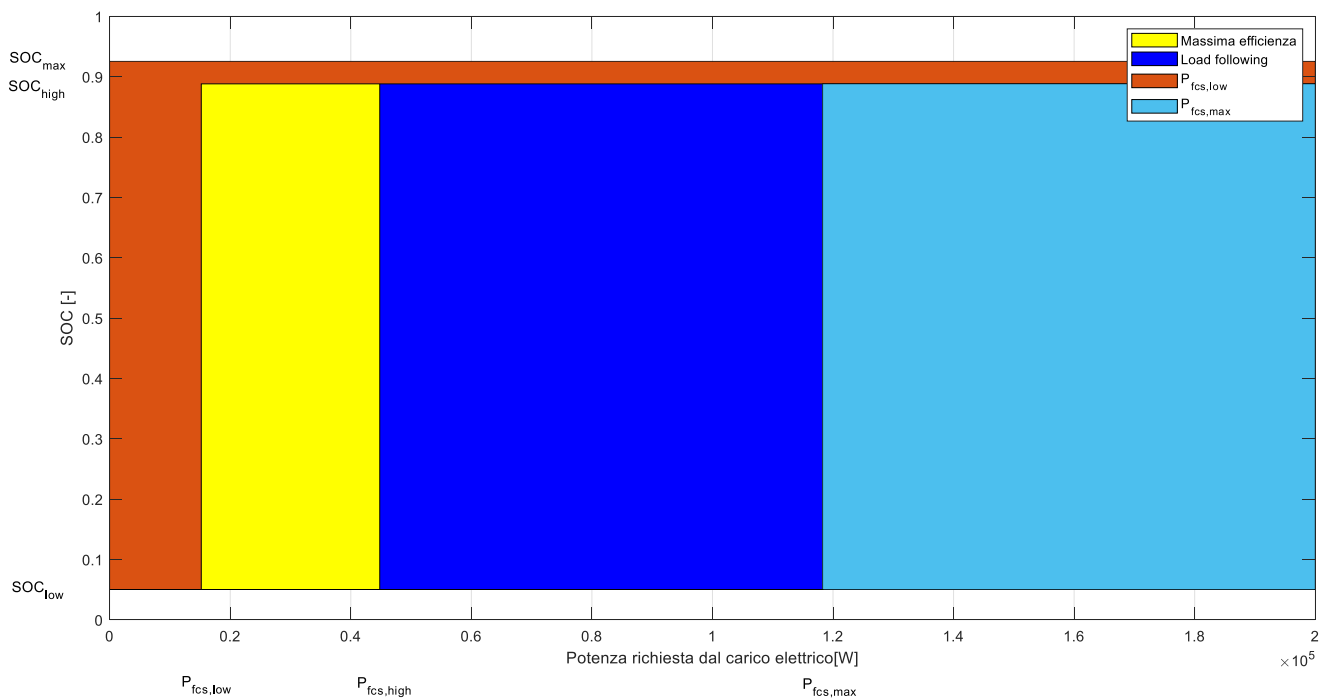


Figura 2.5.7: Mappa risultante dall'ottimizzazione con 50 iterazioni e popolazione di 500.

Come si può osservare, la mappa riportata in figura 2.5.7 rappresenta la versione con maggiori somiglianze rispetto all'originale presente in figura 2.5.1. Tutte le modalità operative hanno un'area sulla mappa di rilevanza, con una predominanza della zona di tipo *load following* e della zona a potenza elevata. Si riportano i valori dei parametri caratteristici della presente mappa nella tabella 2.5.1.

Tabella 2.5.1. Parametri caratteristici della CS risultanti dall'ottimizzazione mediante PSO con 50 iterazioni e popolazione di 500 particelle.

Parametro	Valore
SOC_{max}	0.93
SOC_{min}	0.05
SOC_{high}	0.89
SOC_{low}	0.05
$P_{fcs,max}$	118.29kW
$P_{fcs,maxeff}$	42.5kW
$P_{fcs,low}$	15.18kW
$P_{fcs,high}$	44.82kW

Come si può notare, l'area in cui si opera la FC al valore di potenza $P_{fcs,max}$ pur essendo assai estesa è caratterizzata da un valore di potenza decisamente lontano dal valore massimo di potenza della FC stessa, differenziandosi molto in questo senso da quanto avveniva in [4]. Inoltre anche la zona *load following* è spostata a valori di potenza richiesti al veicolo non elevati. Così facendo la CS in tal modo ottimizzata riesce a minimizzare il consumo d'Idrogeno evitando di operare la FC a valori di potenza eccessivamente elevati. Un'ulteriore importante discrepanza rispetto alla mappa riportata in figura 2.5.1 è rappresentata dal fatto che in figura 2.5.7 i valori di SOC_{min} e di SOC_{low} coincidono. Inoltre il valore di SOC_{max} oltre il quale la FC non è operata è qui pari a 0.93 ed esiste quindi la possibilità che tale FC rimanga spenta per valori di SOC elevati. Si è deciso di utilizzare tale mappa nell'ambito della calibrazione della CS in quanto non soltanto, come visibile in figura 2.5.8, il consumo d'Idrogeno da essa determinato è quello minimo ma poiché si è ripetuta l'ottimizzazione con le medesime caratteristiche per tre volte consecutive e la PSO ha fornito il medesimo risultato sia in termini di mappa che in termini di percorso dei *best cost*. Va anche citato come tale ottimizzazione, tra le soluzioni testate, sia stata la versione caratterizzata dal maggiore tempo richiesto per il suo completamento. Sul medesimo PC citato precedentemente essa ha infatti avuto necessita di circa un giorno e mezzo per arrivare al fine. Si sono anche condotte delle prove variando i livelli di potenza richiesti dalle quattro modalità operative presenti nella mappa e cioè immaginando di mescolare rigidamente i rettangoli presenti in figura 2.5.7 pur mantenendo fisse le regole per la transizione tra gli stati. Tali analisi non hanno però portato ad un miglioramento rispetto a quanto ottenuto mediante l'ultima tipologia di ottimizzazione citata e non si ritiene quindi opportuno descriverne in questa sede il dettaglio.

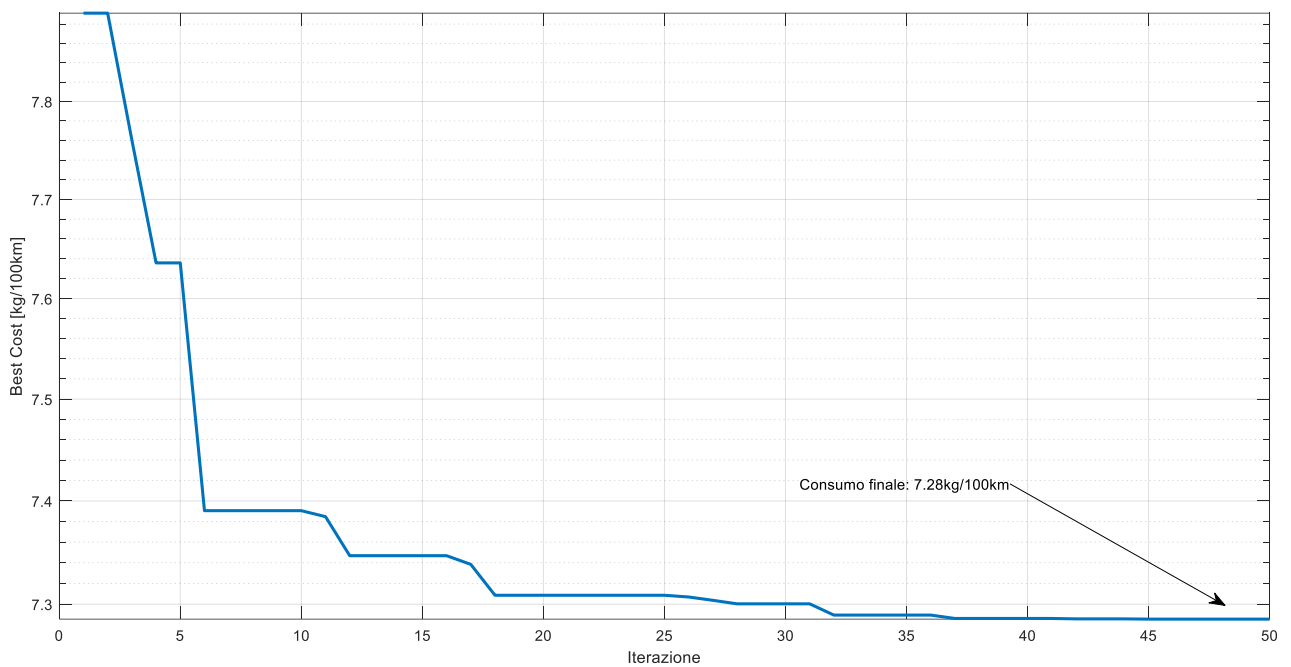


Figura 2.5.8: Andamento dei *best cost* nell'ottimizzazione con 50 iterazioni e 500 particelle.

Come è possibile osservare, si è qui iniziato ad ottenere un risultato di simulazione valido a partire dalla seconda iterazione e tra questa e la sesta iterazione si è avuto il maggiore decremento di consumo d'Idrogeno mediato sui tre cicli guida. A seguito della quarantaduesima iterazione tale consumo si è poi mantenuto costante e pari ad un valore di 7.28kg di Idrogeno ogni 100km, ottenendo così il minimo consumo tra le ottimizzazioni testate in questa sede.

3. Risultati delle simulazioni

Nel presente capitolo verranno esposti i principali e più interessanti risultati delle simulazioni sui tre cicli guida descritti nel capitolo precedente, a valle dell'ottimizzazione della strategia di controllo mediante algoritmi PSO. Si provvederà anche ad analizzare il confronto tra i comportamenti della DP e detti risultati.

3.1 – Risultati su ciclo CARB-Heavyduty

Si riporta in primo luogo in figura 3.1.1 l'andamento dei profili di velocità richiesta ed effettiva del veicolo. Si è qui scelto, vista la ripetitività del ciclo, di riportare per maggiore chiarezza uno *zoom* su un singolo dei dieci cicli concatenati che costituiscono l'intero ciclo guida. Come si può notare il *driver* segue in maniera efficiente il profilo di velocità richiesto dalla missione guida.

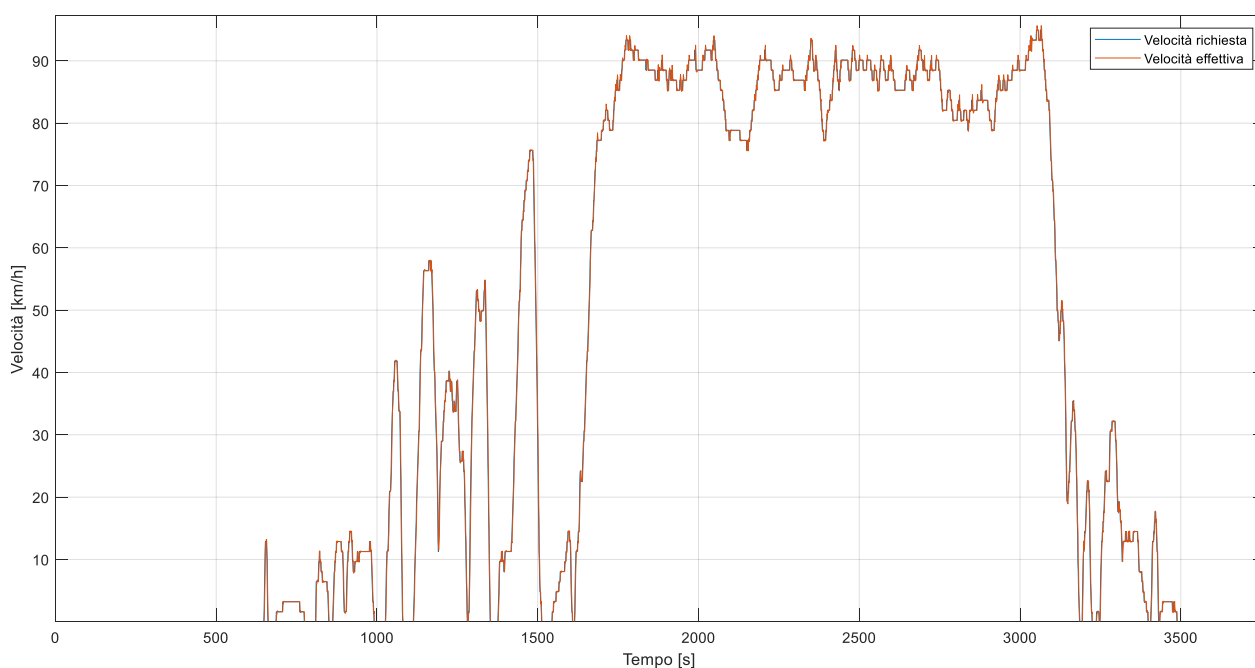


Figura 3.1.1: Profili di velocità su ciclo “CARB-Heavyduty”.

Si riporta invece in figura 3.1.2 l'andamento dei profili di coppia richiesta al motore elettrico di trazione a monte e a valle del controllo dei limiti di coppia sul medesimo. Come si può notare, tale richiesta di coppia è limitata sia nell'ambito della trazione che della frenata ed in particolare in alcuni punti in cui si richiede un valore di coppia decisamente elevato in relazione alla velocità angolare di rotazione il profilo di coppia è efficacemente appianato.

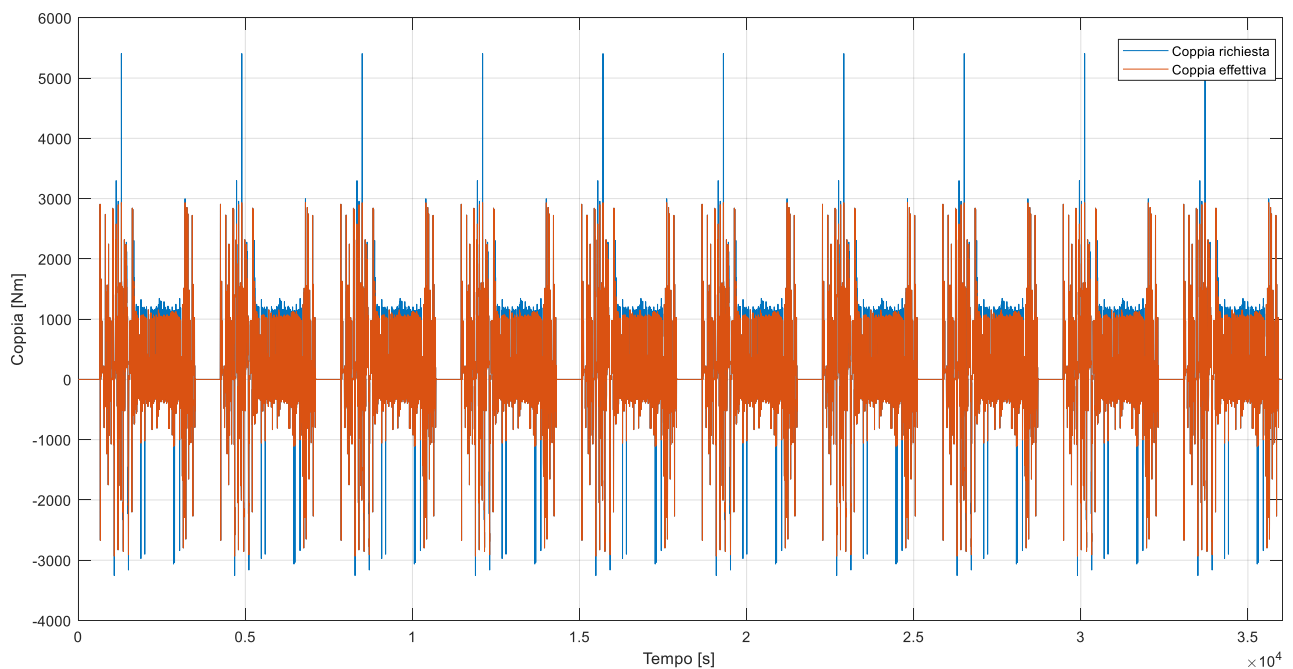


Figura 3.1.2: Profili di coppia su ciclo guida “CARB-Heavyduty”.

Si riporta in figura 3.1.3 l’andamento dei profili di potenza richiesti alla FC e al pacco batterie lungo il ciclo guida. Come si può notare, la CS opera in modo da mantenere la FC in un *range* di potenza non troppo esteso ed in cui essa funziona con valori di efficienza alti mentre la batteria è utilizzata come *peaking power source*.

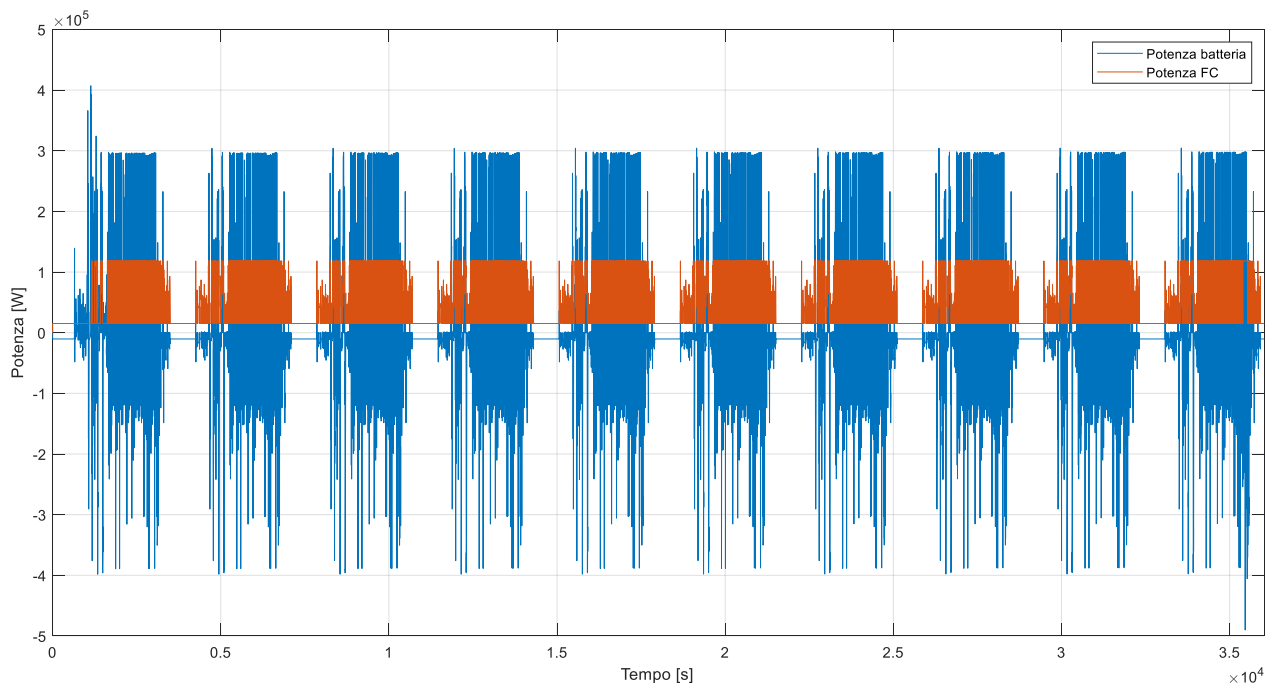


Figura 3.1.3: Profili di potenza richiesta alla FC e alla batteria su ciclo guida “CARB-Heavyduty”.

Si riporta in figura 3.1.4 l'andamento dell'efficienza della FC lungo il ciclo guida considerato. Come si può intuire, con la calibrazione della CS effettuata la FC non è mai spenta durante la missione guida ed è operata ad un valore di efficienza media relativamente elevato e pari a 0.45.

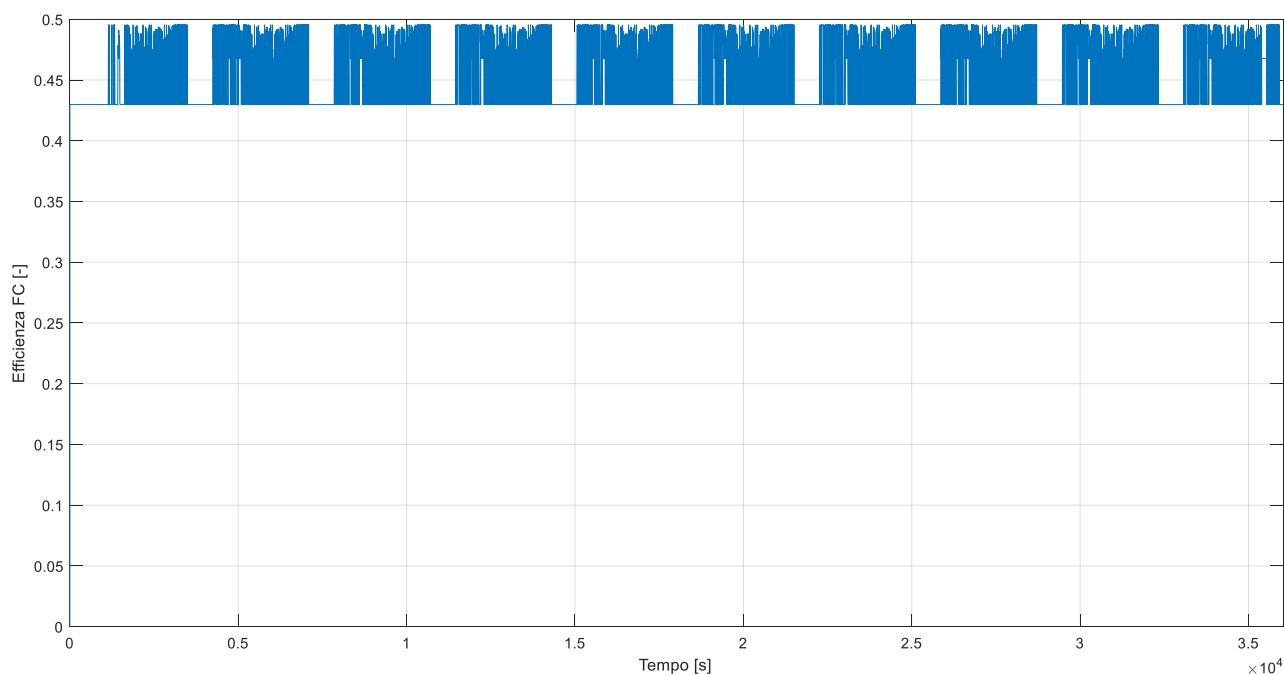


Figura 3.1.4: Andamento dell'efficienza della FC su ciclo guida "CARB-Heavyduty".

Si riporta invece in figura 3.1.5 il profilo di SOC lungo il ciclo guida. Come si può notare esso è del tipo *charge depleting* e, vista la consistente lunghezza del ciclo pari a 413km, partendo da un valore iniziale pari a 0.89 (valore comune a tutti i cicli guida) si ottiene un SOC finale pari a 0.07.

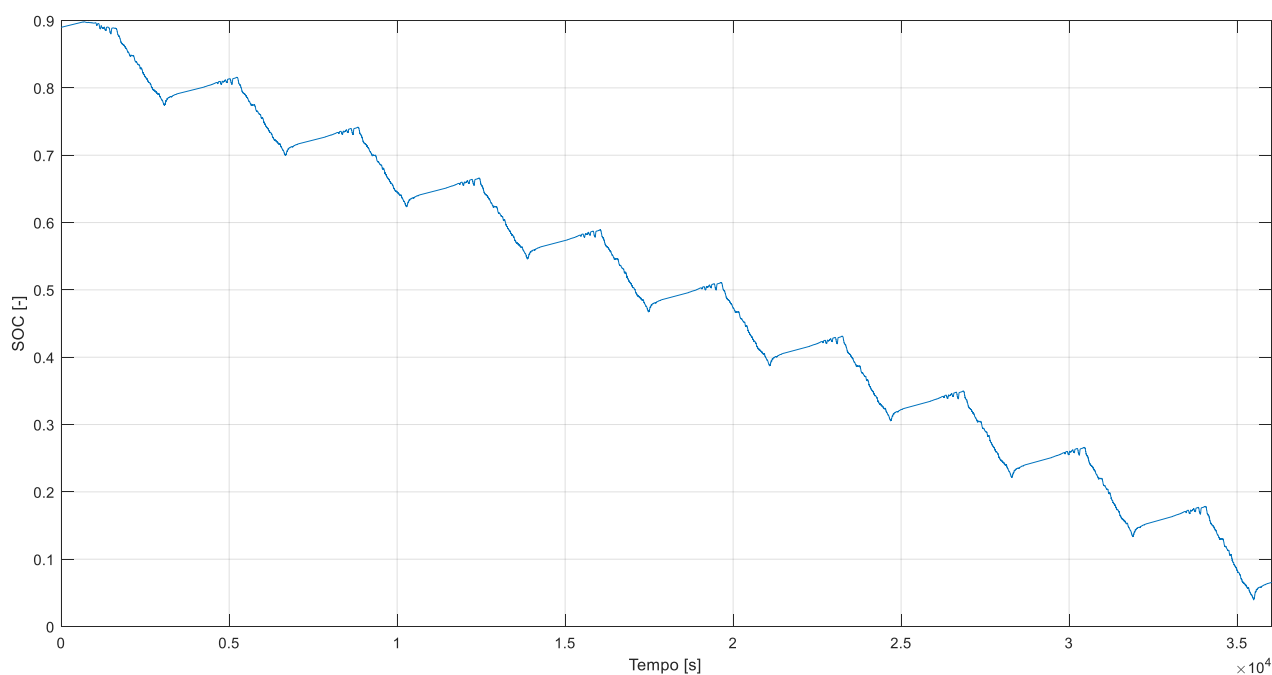


Figura 3.1.5: Profilo di SOC su ciclo guida "CARB-Heavyduty".

Per concludere si riporta in figura 3.1.6 l'andamento da un lato del consumo di Idrogeno istantaneo da parte della FC e dall'altro l'andamento cumulato del medesimo. Il consumo finale al termine del ciclo guida risulta essere pari a 30.4kg.

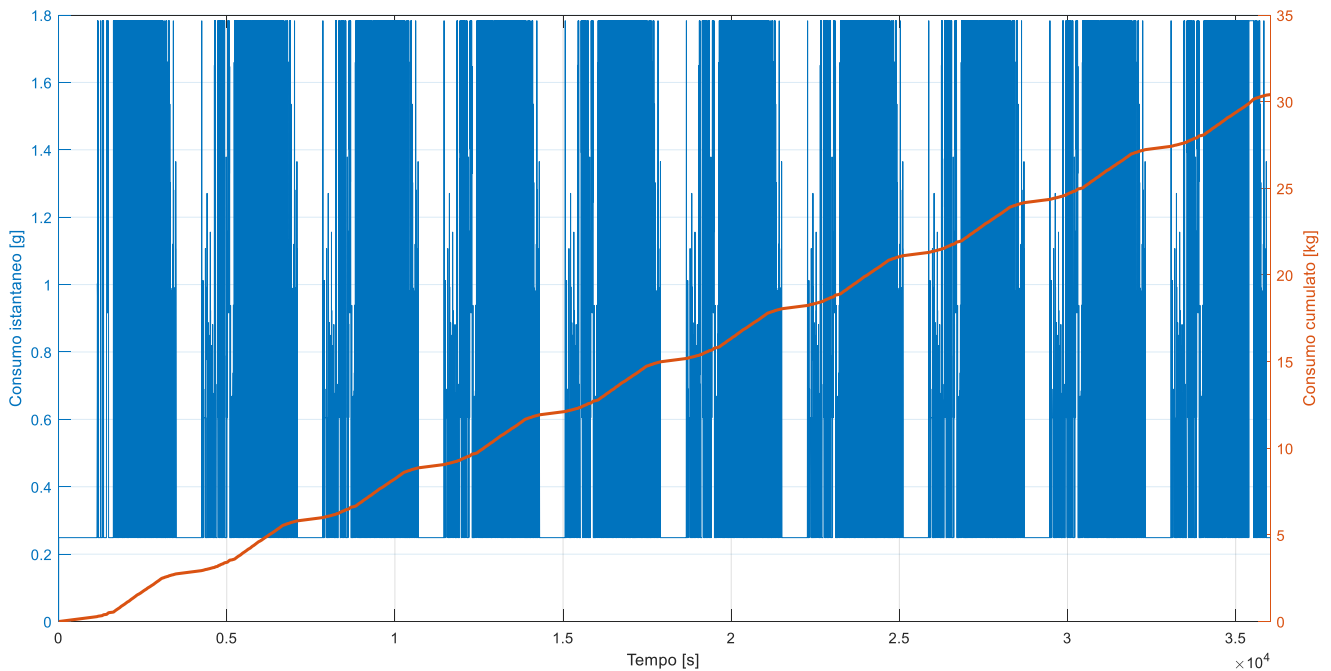


Figura 3.1.6: Andamento del consumo istantaneo e cumulato d'Idrogeno su ciclo guida "CARB-Heavyduty".

3.2– Risultati su ciclo Urban+LongHawl+Urban

Si riporta innanzitutto in figura 3.2.1 l'andamento dei profili di velocità di riferimento ed effettiva del veicolo. Come è possibile osservare, il *driver* segue bene il profilo di velocità *target*. Sono invece riportati in figura 3.2.2 i profili di coppia richiesta al motore elettrico di trazione a monte e a valle del controllo dei limiti di coppia sul medesimo. Come si può notare è limitata soprattutto la coppia nell'ambito della frenata. Dal punto di vista della coppia richiesta il ciclo guida qui considerato è più dinamico rispetto al CARB-Heavyduty e tale coppia subisce limitazioni di maggiore entità. In figura 3.2.3 si descrive invece l'andamento dei profili di potenza richiesti alla FC e alla batteria. Possono essere qui effettuate considerazioni analoghe rispetto a quanto espresso in descrizione della figura 3.1.3.

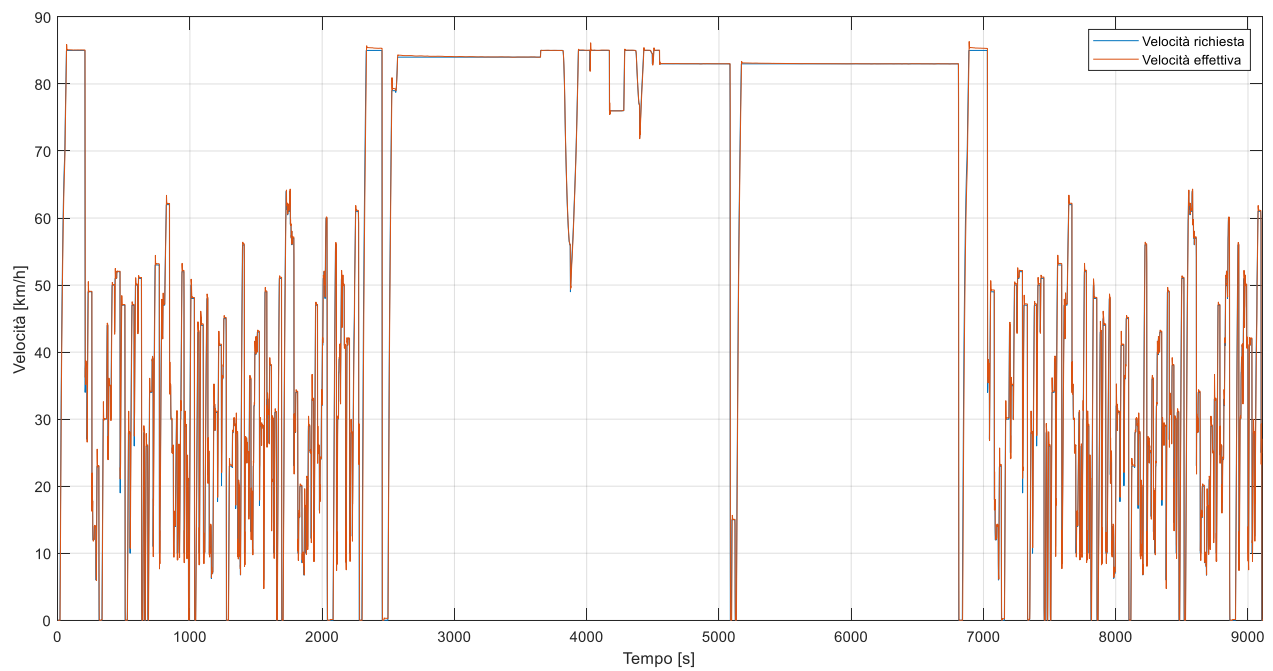


Figura 3.2.1: Profili di velocità su ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

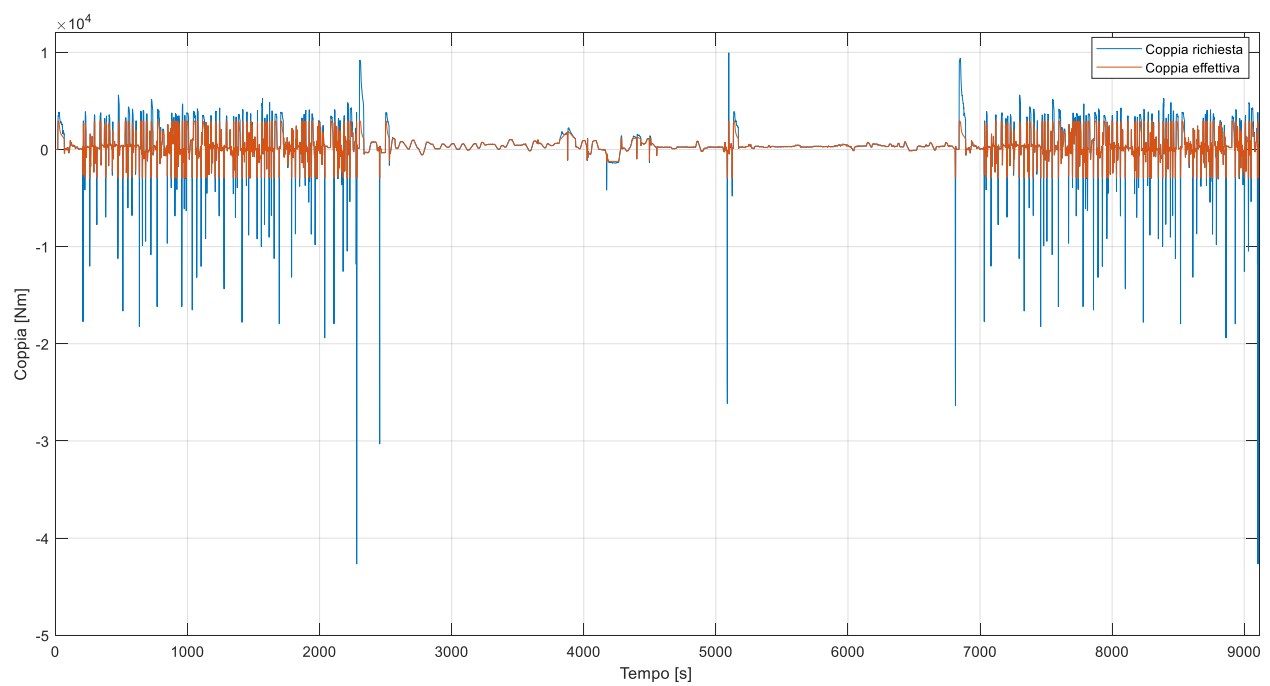


Figura 3.2.2: Profili di coppia richiesta e coppia effettiva al motore elettrico su ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

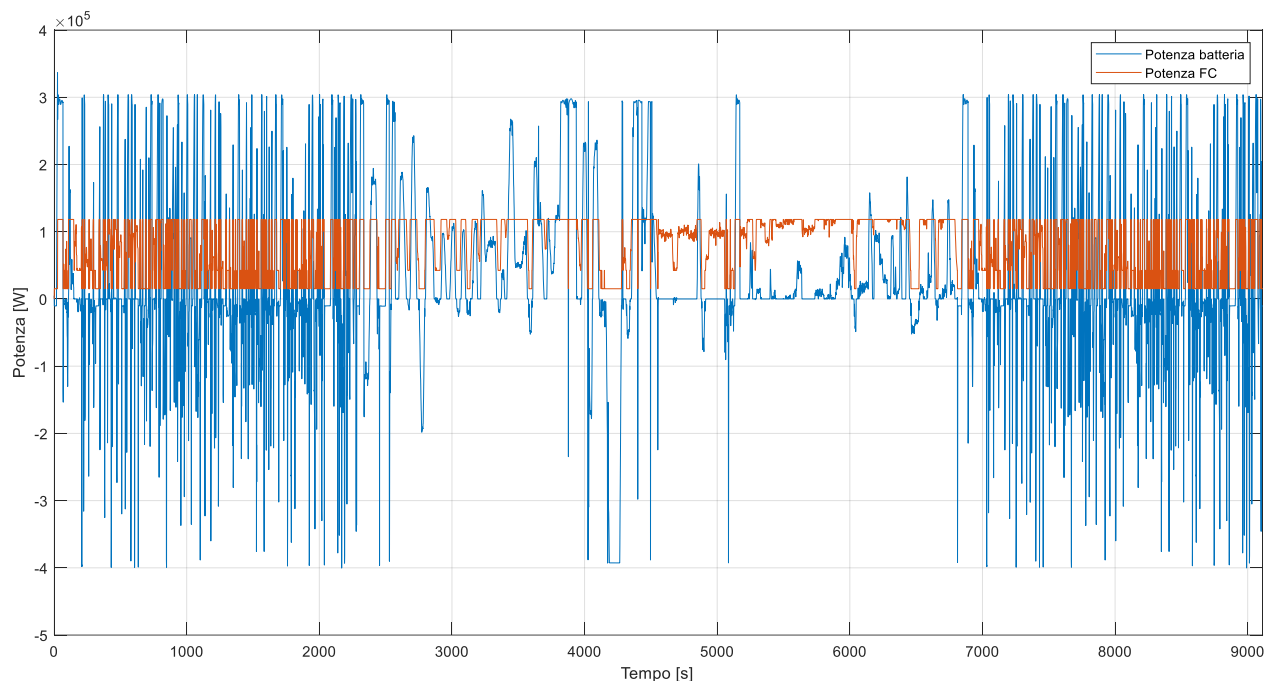


Figura 3.2.3: Profili di potenza richiesti alla FC e alla batteria su ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

Si riporta in figura 3.2.4 il profilo di efficienza operativa della FC lungo la missione guida. Possono qui essere effettuate le medesime considerazioni rispetto a quanto svolto per la figura 3.1.4, con la differenza che il valore medio di efficienza nel caso presente è pari a 0.46.

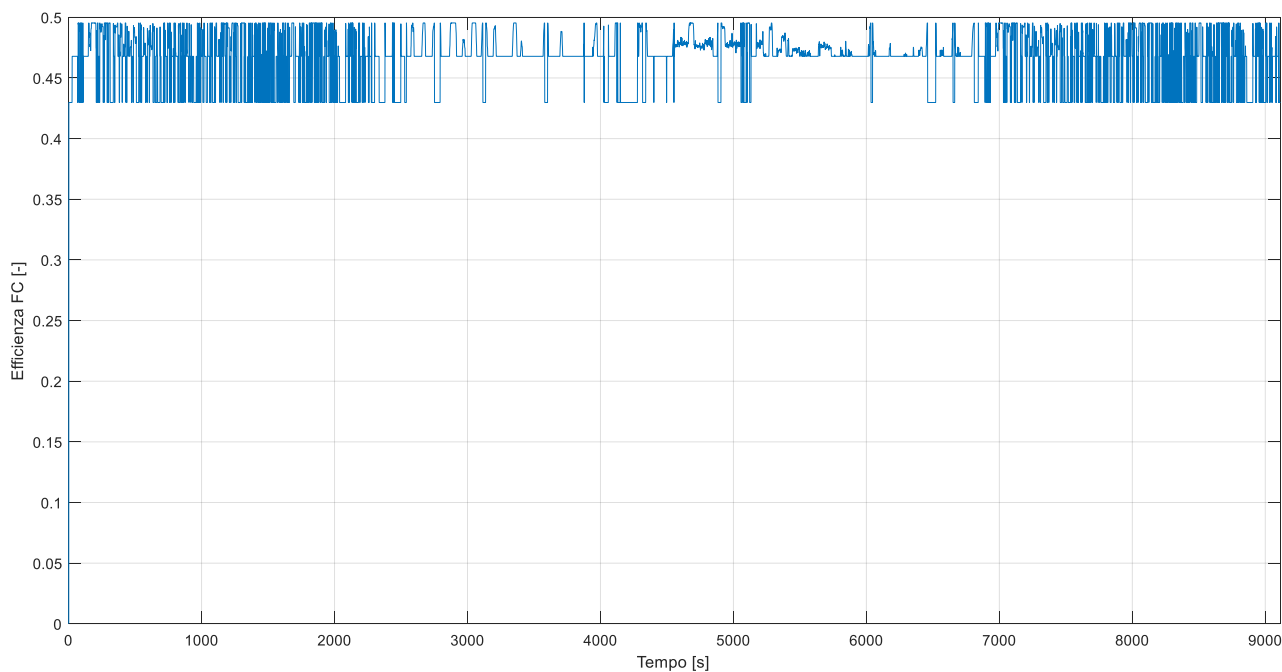


Figura 3.2.4: Profilo di efficienza della FC su ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

Si riporta in figura 3.2.5 il profilo di SOC lungo la missione guida. Il suo valore finale al termine del ciclo considerato è pari a 0.63.

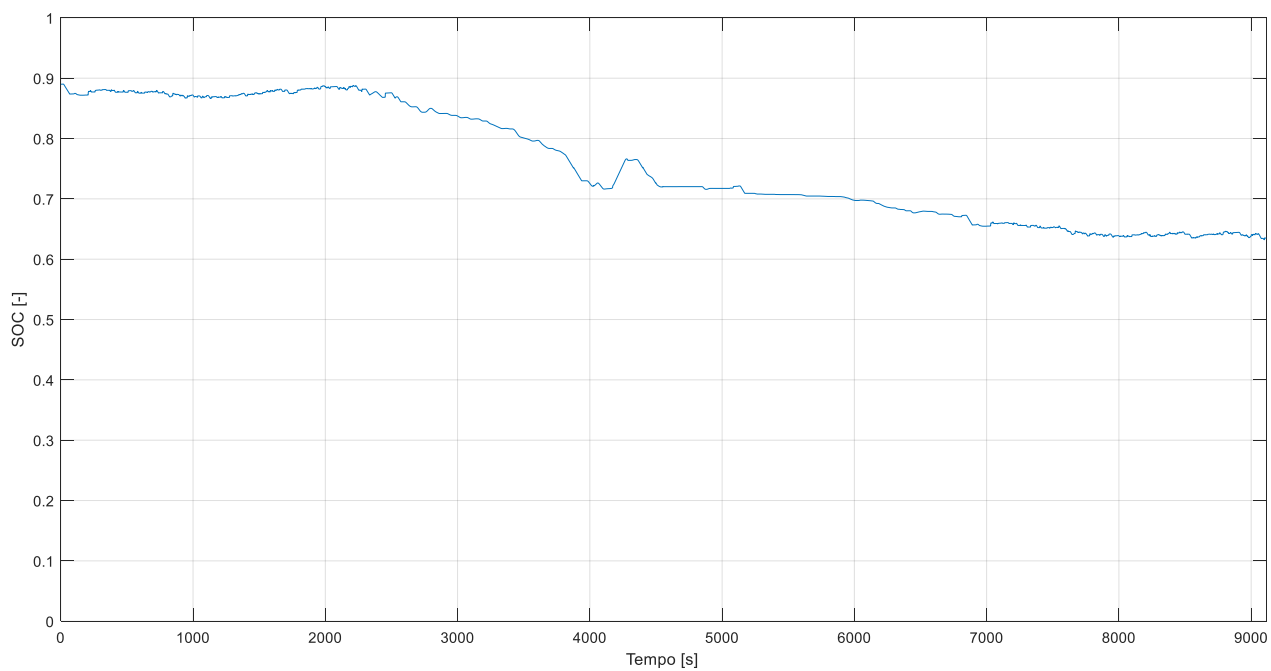


Figura 3.2.5: Profilo di SOC su ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

Per concludere, si riporta in figura 3.2.6 l’andamento del consumo istantaneo di Idrogeno e cumulado lungo il ciclo guida. Il valore finale di detto consumo è pari a 10.8kg.

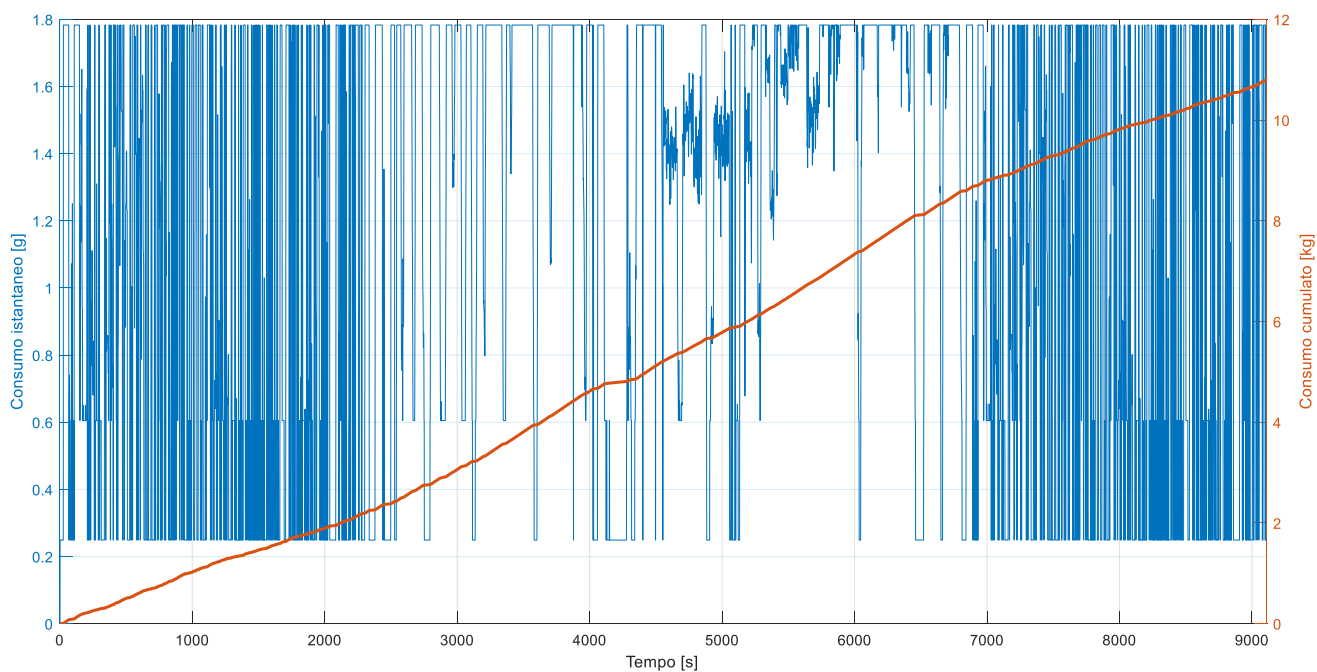


Figura 3.2.6: Andamenti di consumo istantaneo e cumulado d’Idrogeno su ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

3.3– Risultati su ciclo *Regional+Urban*

Si riporta in figura 3.3.1 l'andamento dei profili di velocità *target* ed effettiva del veicolo sul ciclo guida considerato. E' possibile qui notare come il *driver* operi efficientemente.

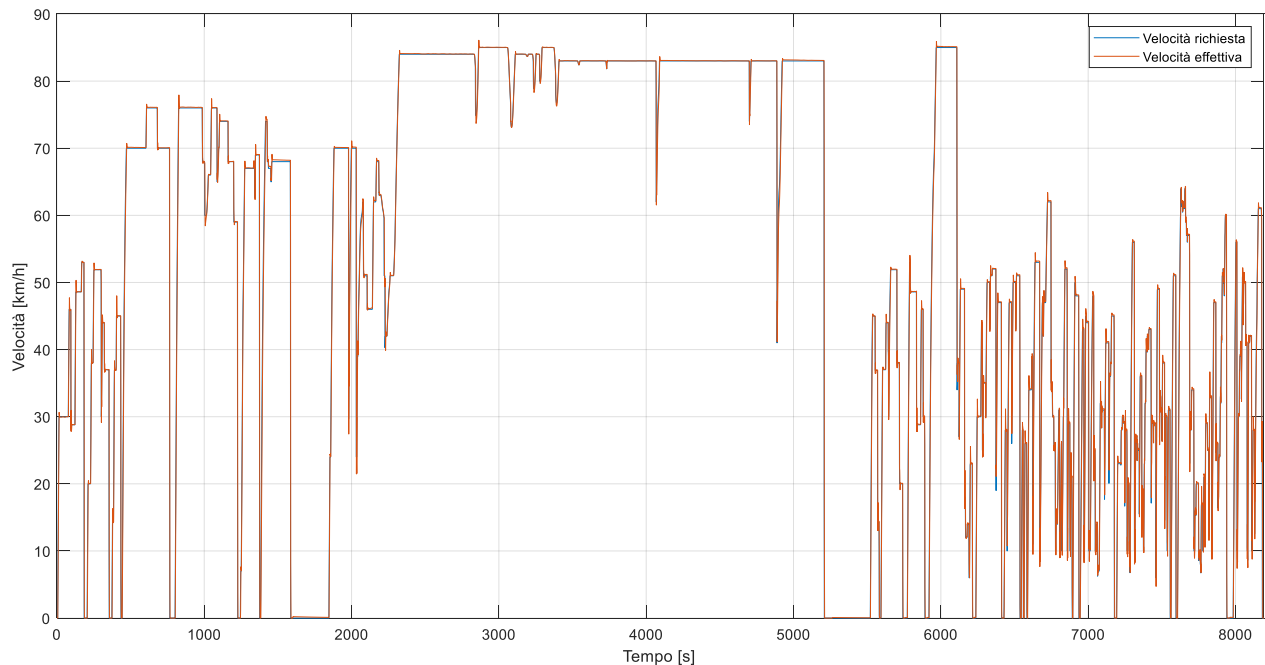


Figura 3.3.1: Profili di velocità di riferimento ed effettiva su ciclo guida “Regional+Urban”.

Si riporta invece in figura 3.3.2 l'andamento della coppia richiesta al motore elettrico di trazione a monte e a valle del controllo dei limiti di coppia su di esso. Si possono qui effettuare analoghe considerazioni rispetto a quanto detto nel caso della figura 3.2.2. In figura 3.3.3 sono invece riportati gli andamenti di potenza richiesta alla FC e al pacco batterie lungo il ciclo guida. Anche in questo caso possono qui effettuarsi le medesime osservazioni citate per i due cicli guida sin qui esaminati.

Si riporta in figura 3.3.4 l'andamento dell'efficienza operativa della FC lungo la missione guida. Valgono qui le medesime affermazioni esposte per le figure 3.2.4 e 3.1.4 con la differenza che nel caso in esame l'efficienza media lungo il ciclo guida risulta essere pari a 0.46. E' poi possibile osservare in figura 3.3.5 l'andamento dello SOC durante il ciclo considerato. Il valore finale al termine della missione guida risulta essere pari a 0.66.

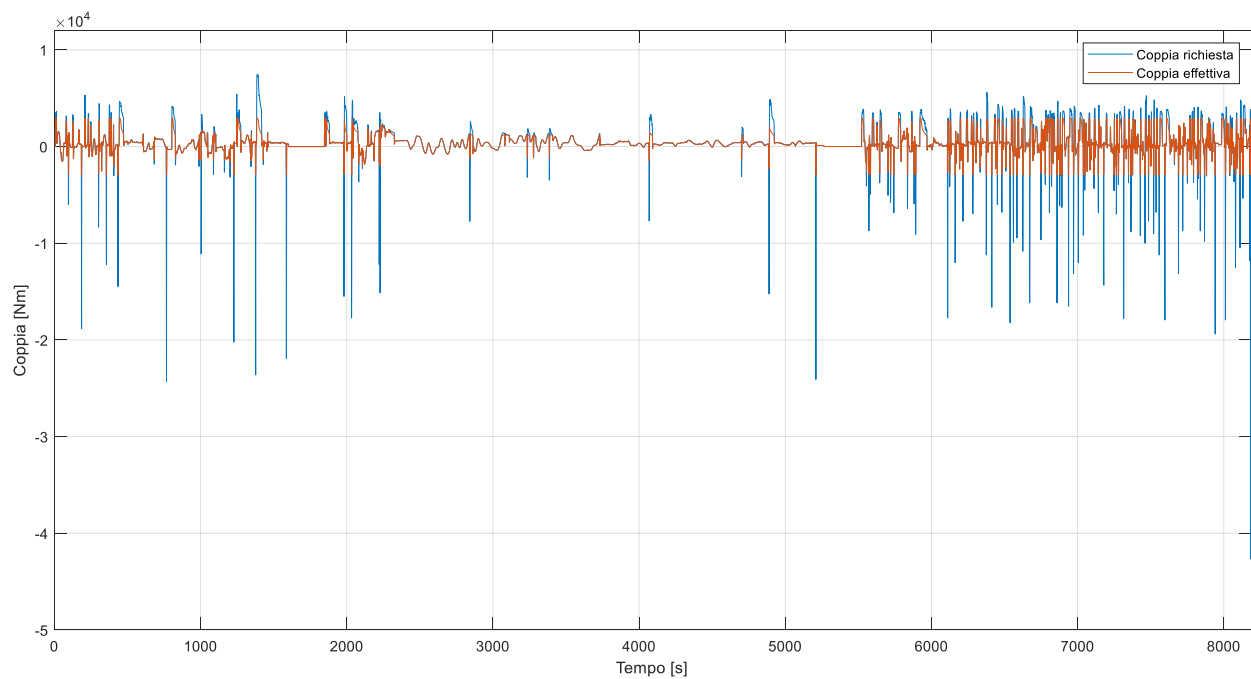


Figura 3.3.2: Profili di coppia richiesta al motore elettrico su ciclo “Regional+Urban”.

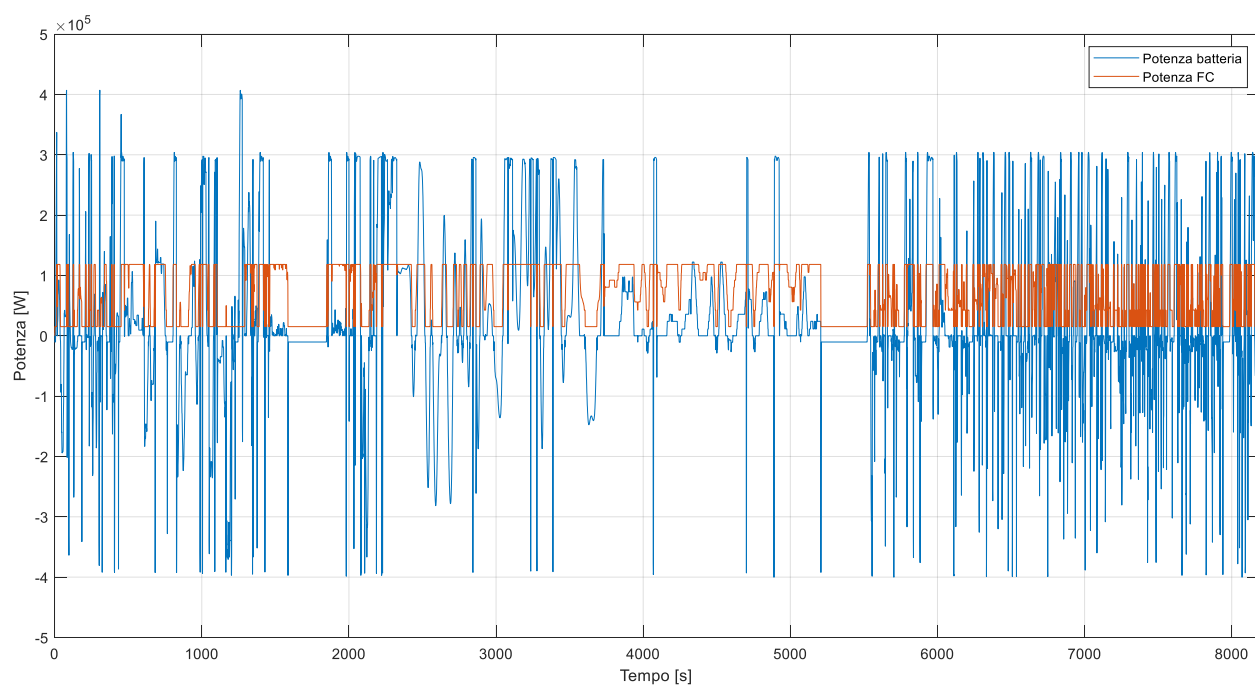


Figura 3.3.3: Profili di potenza richiesta alla FC e alla batteria su ciclo guida “Regional+Urban”.

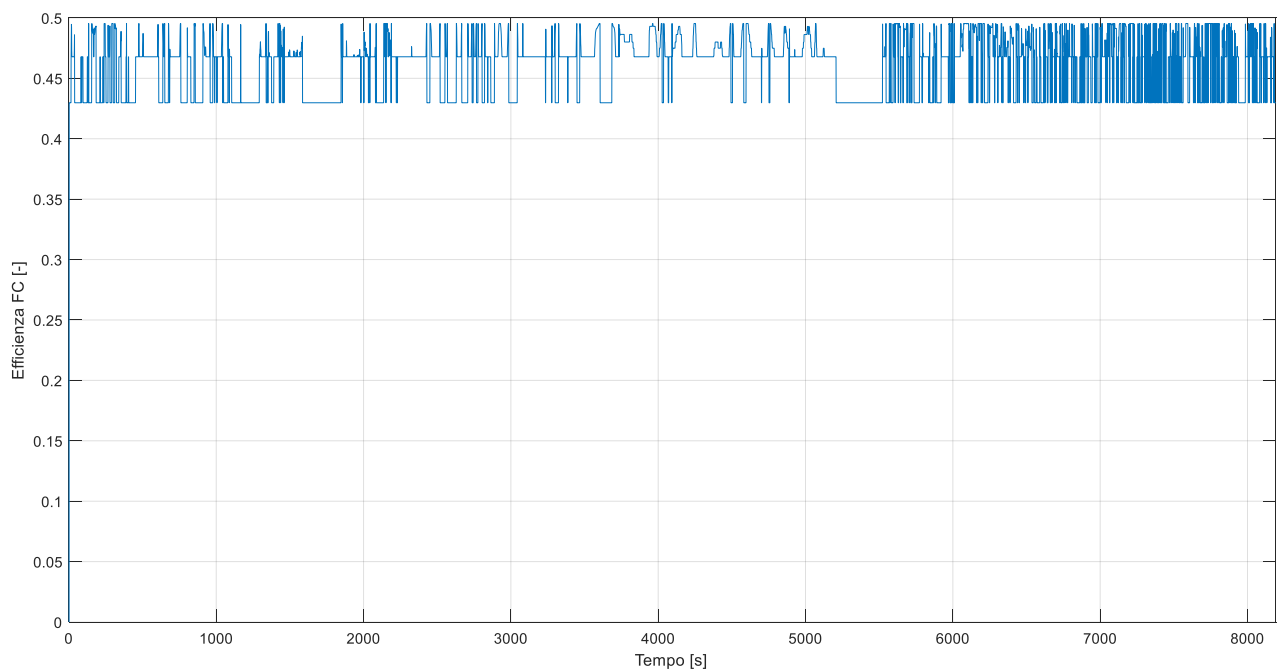


Figura 3.3.4: Andamento dell'efficienza della FC su ciclo guida "Regional+Urban".

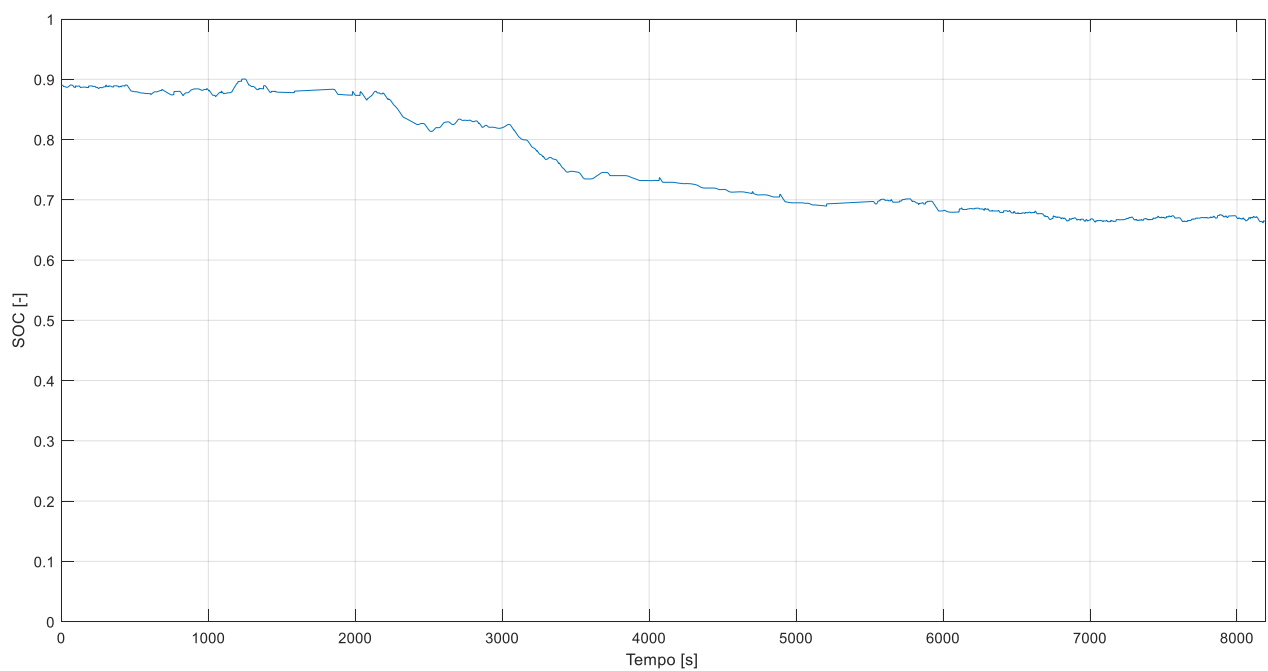


Figura 3.3.5: Profilo di SOC su ciclo guida "Regional+Urban".

Concludendo, si riporta in figura 3.3.6 l'andamento del consumo istantaneo e cumulato d'Idrogeno lungo il ciclo guida. Il consumo finale si attesta ad un valore pari a 8.8kg.

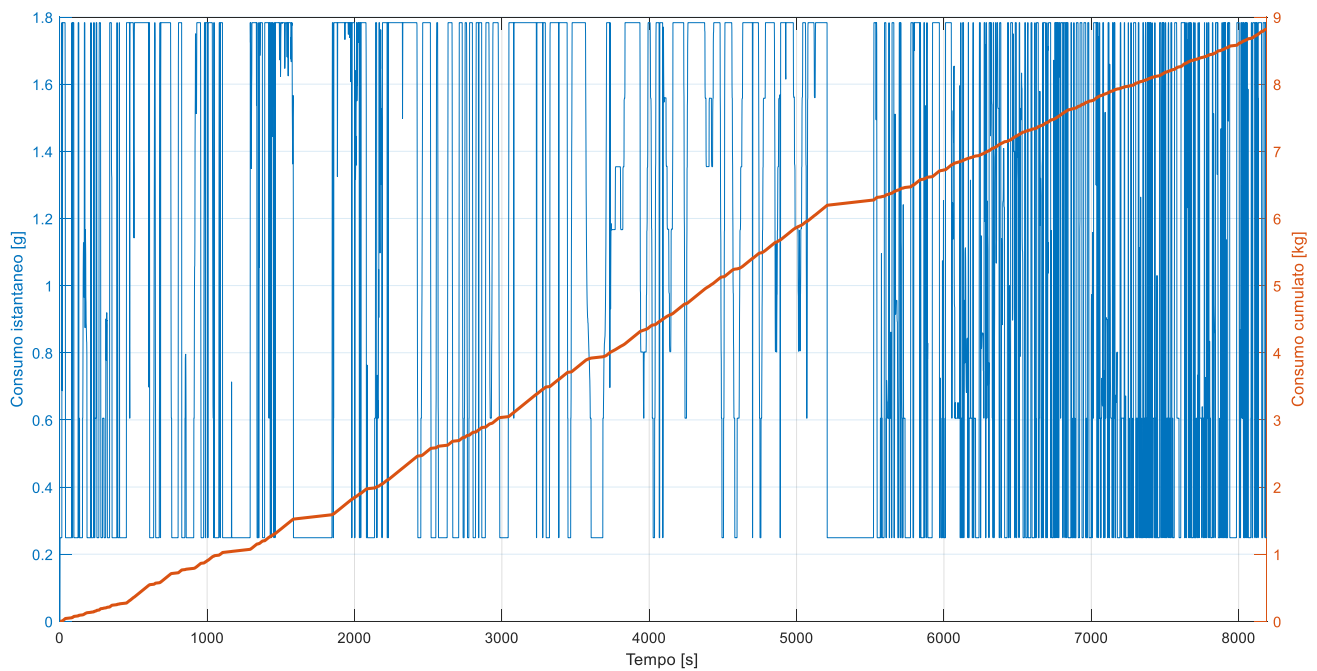


Figura 3.3.6: Profili di consumo istantaneo e cumulado d’Idrogeno su ciclo guida “Regional+Urban”.

3.4 – Confronto con i risultati della DP

Come già citato nei precedenti capitoli, al fine di ottenere un *benchmark* rispetto ad una soluzione rappresentante l’ottimo globale su un dato ciclo guida è utile utilizzare i risultati di una GOS. In particolare si è scelto nel presente lavoro di utilizzare la *Dynamic Programming* implementata in ambiente Matlab e funzionante con un *timestep* pari ad 1s. Tra i *constraints* forniti alla DP si è chiaramente inserito il valore di SOC iniziale uniforme per tutti i cicli guida pari a 0.89 ma anche un valore di SOC finale tale da poter garantire in ciascun ciclo guida un’autonomia di 430km. Tale considerazione sarà di cruciale importanza nella valutazione dei risultati, come si vedrà nel seguito. Si tratteranno in questo paragrafo i confronti per i tre cicli guida considerati nell’ordine dei paragrafi precedenti. In particolare, principiando dal ciclo guida CARB-Heavyduty si riporta in figura 3.4.1 il confronto tra i profili di potenza alla FC. Come si può notare, escludendo alcuni istanti in cui la potenza impostata dalla DP risulta avere un valore decisamente elevato, il *range* di potenza coperto dalla DP ha un’ampiezza decisamente minore rispetto a quanto effettuato dalla MB. Inoltre la DP tende a spegnere molto più frequentemente la FC rispetto alla MB nella quale, per come si è calibrato il valore di SOC_{max} oltre il quale la FC è spenta, si tiene la *fuel-cell stack* sempre accesa durante il ciclo guida.

Si riporta in figura 3.4.2 il confronto tra profili di potenza richiesta alla batteria. Come si può notare, anche alla luce delle considerazioni esposte per la figura precedente, la DP tende generalmente a richiedere potenze alla batteria in un intervallo di ampiezza leggermente maggiore rispetto alla MB.

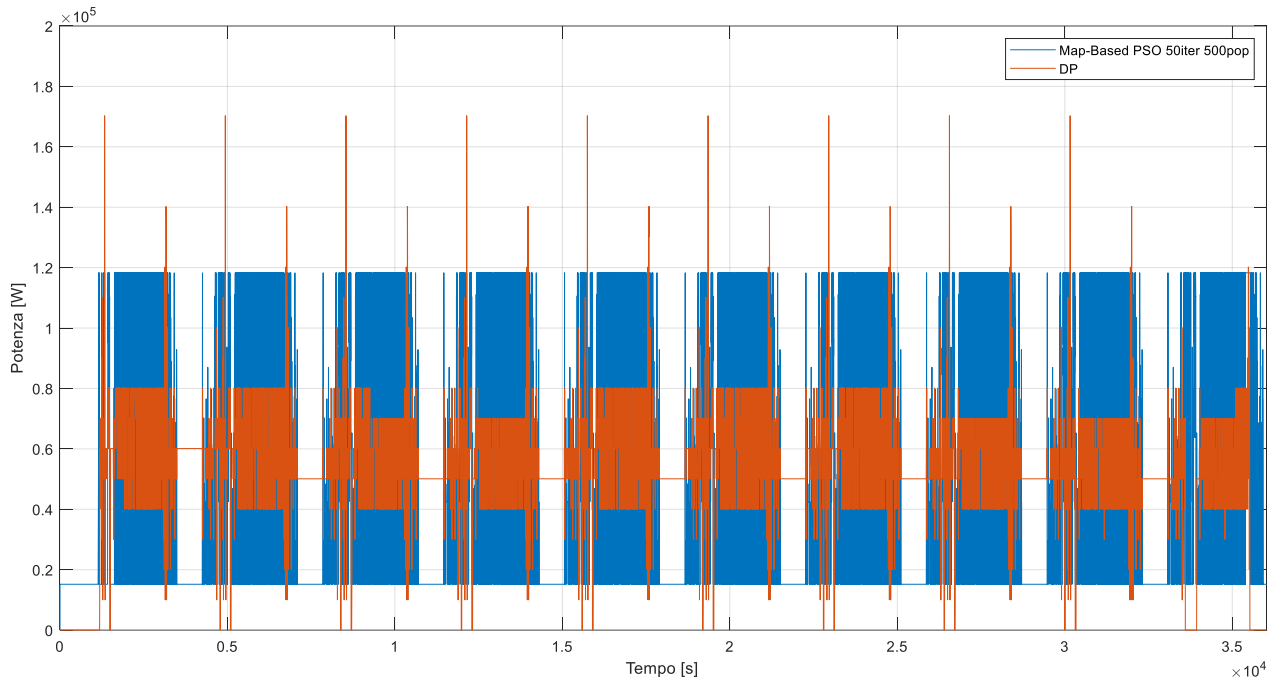


Figure 3.4.1: Confronto tra profili di potenza richiesta alla FC su ciclo guida “CARB-Haevy duty”.

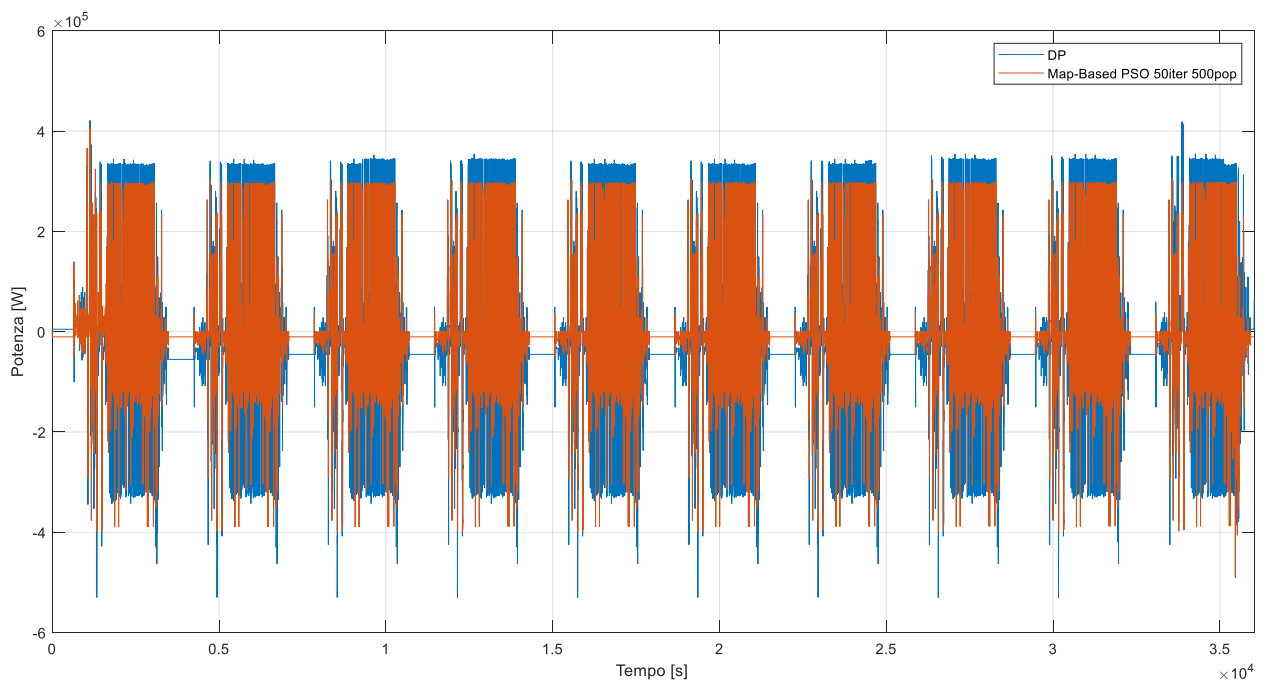


Figura 3.4.2: Profili di potenza richiesta alla batteria su ciclo guida “CARB-Heavyduty”.

Si riportano invece in figura 3.4.3 i profili di SOC risultanti dalle due strategie di controllo. Come si può ben notare, la forma dei profili ed il loro andamento è decisamente simile. La principale differenza risiede nel fatto che la DP tende ad utilizzare in maniera meno marcata la batteria ed infatti il valore di SOC finale al termine del ciclo guida è maggiore rispetto al caso della MB.

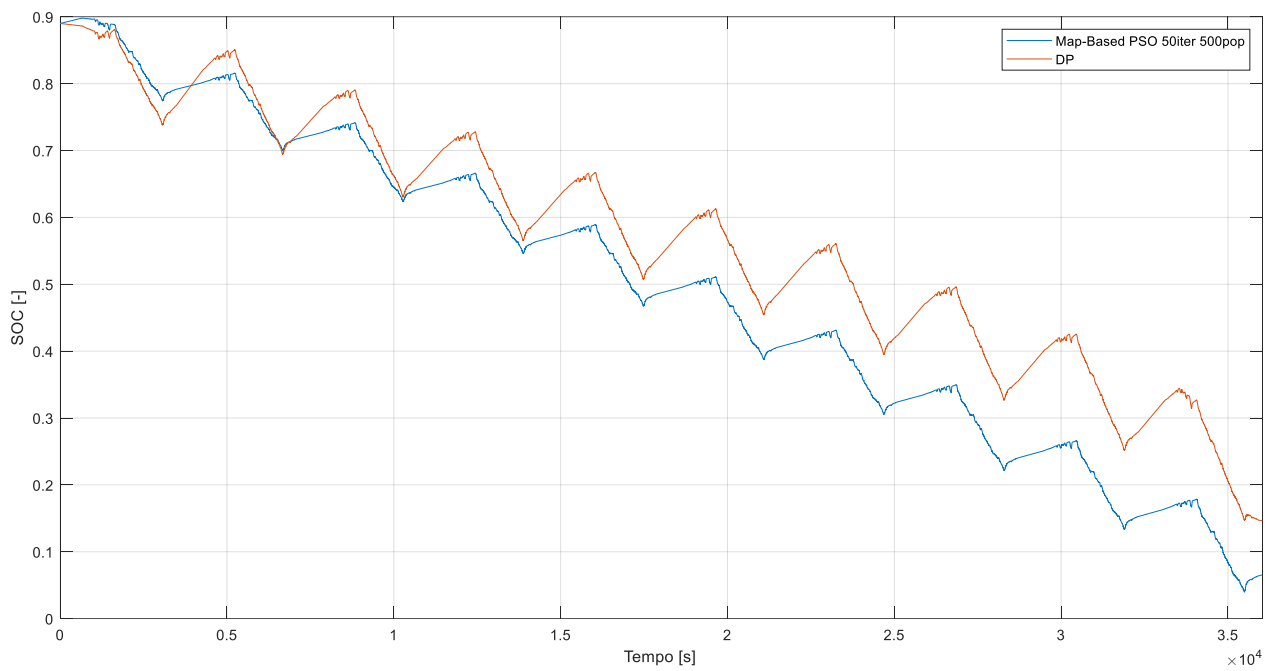


Figura 3.4.3: Profili di SOC su ciclo guida “CARB-Heavyduty”.

Si riportano in figura 3.4.4 i profili di efficienza della FC lungo la missione guida considerata.

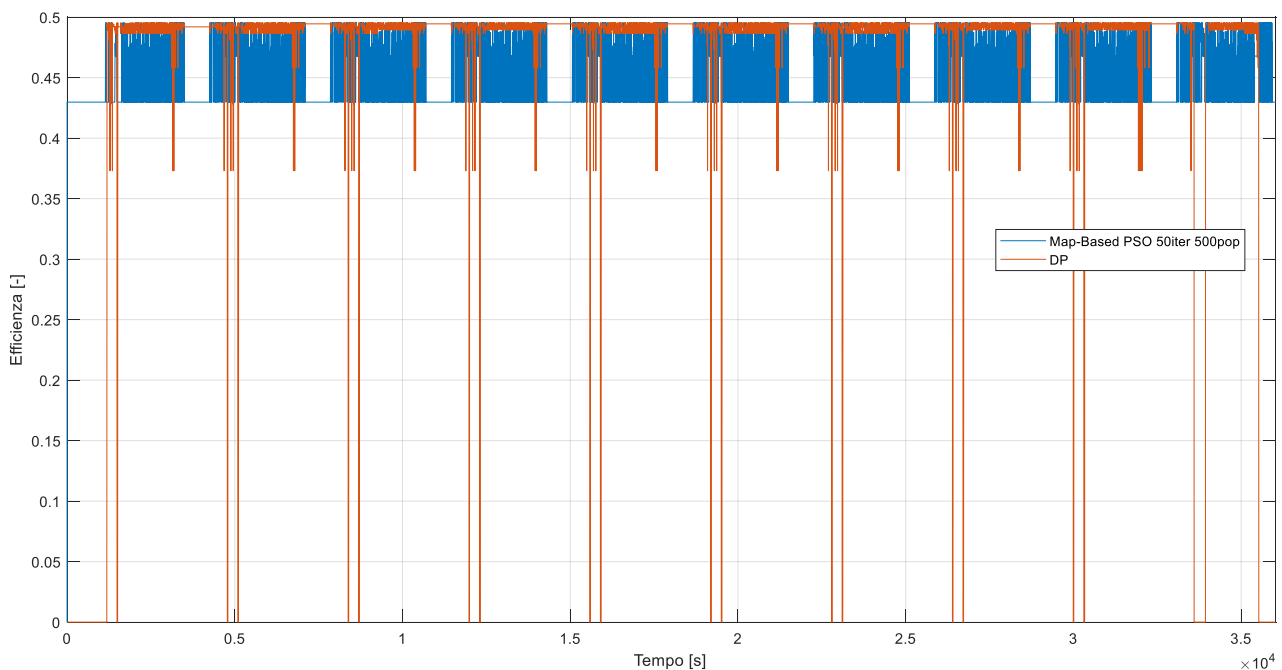


Figura 3.4.4: Profili di efficienza della FC su ciclo guida “CARB-Heavyduty”.

Come si può notare la DP, pur operando talvolta la FC a valori di efficienza decisamente più bassi rispetto alla MB, ha un profilo caratterizzato da un'efficienza media calcolata sui punti in cui la FC è attiva pari a 0.49. Tale valore è più elevato rispetto all'efficienza media della MB che si attesta ad un valore pari a 0.45.

Si riporta ora in figura 3.4.5 l'andamento dei consumi istantanei di Idrogeno lungo il ciclo guida.

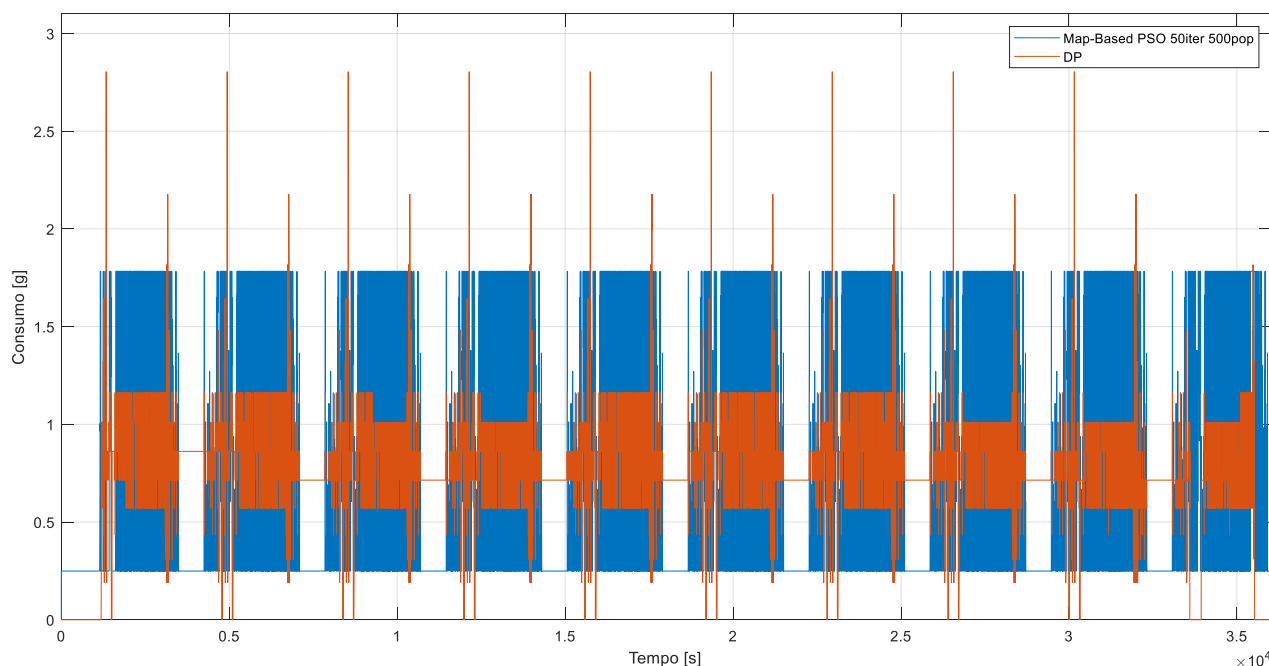


Figura 3.4.5: Profili di consumo istantaneo di Idrogeno su ciclo guida “CARB-Heavyduty”.

Come si può notare, la DP impiega saltuariamente punti operativi della FC che determinano un consumo d’Idrogeno superiore a quanto emerge dai risultati della strategia MB. In generale, però, la MB opera la FC in un *range* di punti operativi che determinano un’ampiezza della banda di consumo istantaneo decisamente maggiore rispetto alla DP. La MB quindi impiega sia punti caratterizzati da un consumo decisamente superiore rispetto alla DP sia punti operativi con un consumo minore. A livello medio, però, la DP ha un consumo d’Idrogeno istantaneo pari a 0.78g mentre la MB pari a 0.84g. Ciò determina un consumo finale d’Idrogeno superiore per quanto concerne la MB. I valori specifici saranno riportati in una tabella riassuntiva al termine del presente paragrafo.

Considerando ora il ciclo Urban+LongHawl+Urban si riporta in figura 3.4.6 il confronto tra profili di potenza richiesti alla FC. Come si può notare, pur essendo presenti degli istanti in cui la DP opera la FC a valori di potenza superiori rispetto alla MB, la banda di potenza in cui la FC è operata ha un’ampiezza minore rispetto al caso della MB ed è spostata a valori di potenza in generale minori. Ciò determina un andamento opposto nei profili di potenza richiesti alla batteria, riportati in figura 3.4.7. La DP sul ciclo guida in esame tende quindi a sfruttare maggiormente la batteria rispetto a quanto avviene con la MB. Proprio alla luce di ciò, osservando i profili di SOC riportati in figura 3.4.8, il profilo di SOC della DP tende a scendere alla fine del ciclo guida ad un valore inferiore rispetto a quanto avviene per la MB. La forma di detti profili è assai simile e, per un primo tratto del ciclo, sono quasi sovrapponibili.

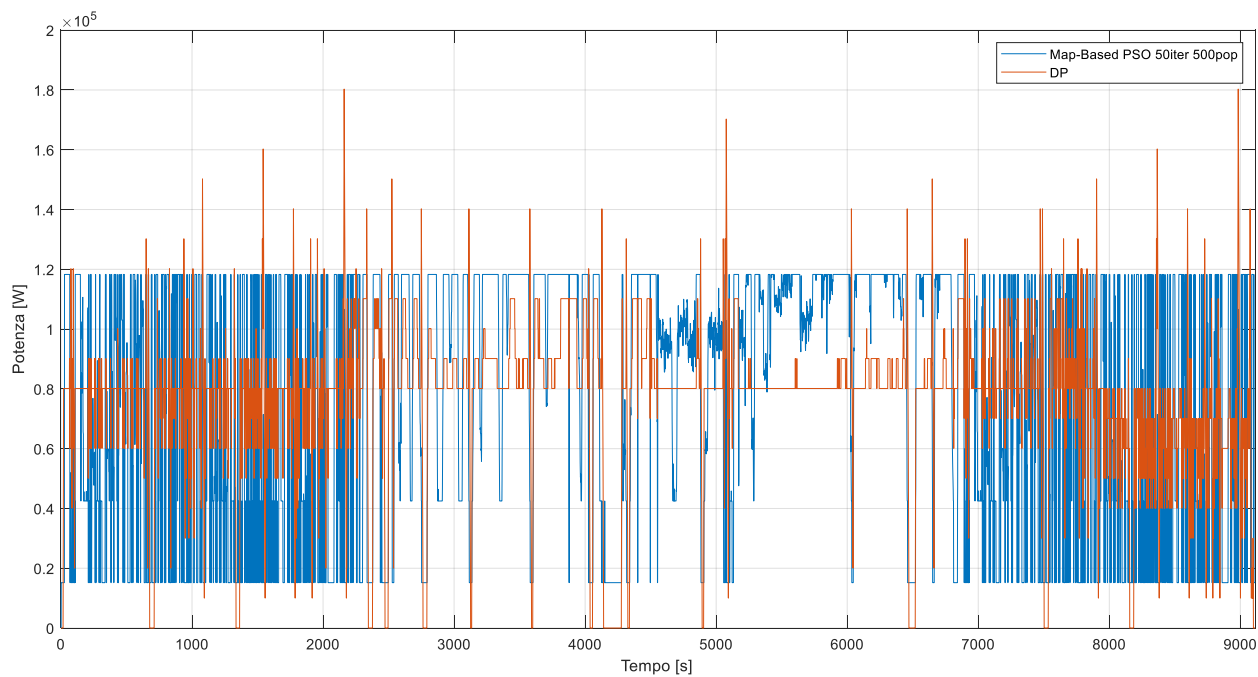


Figura 3.4.6: Profili di potenza richiesti alla FC su ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

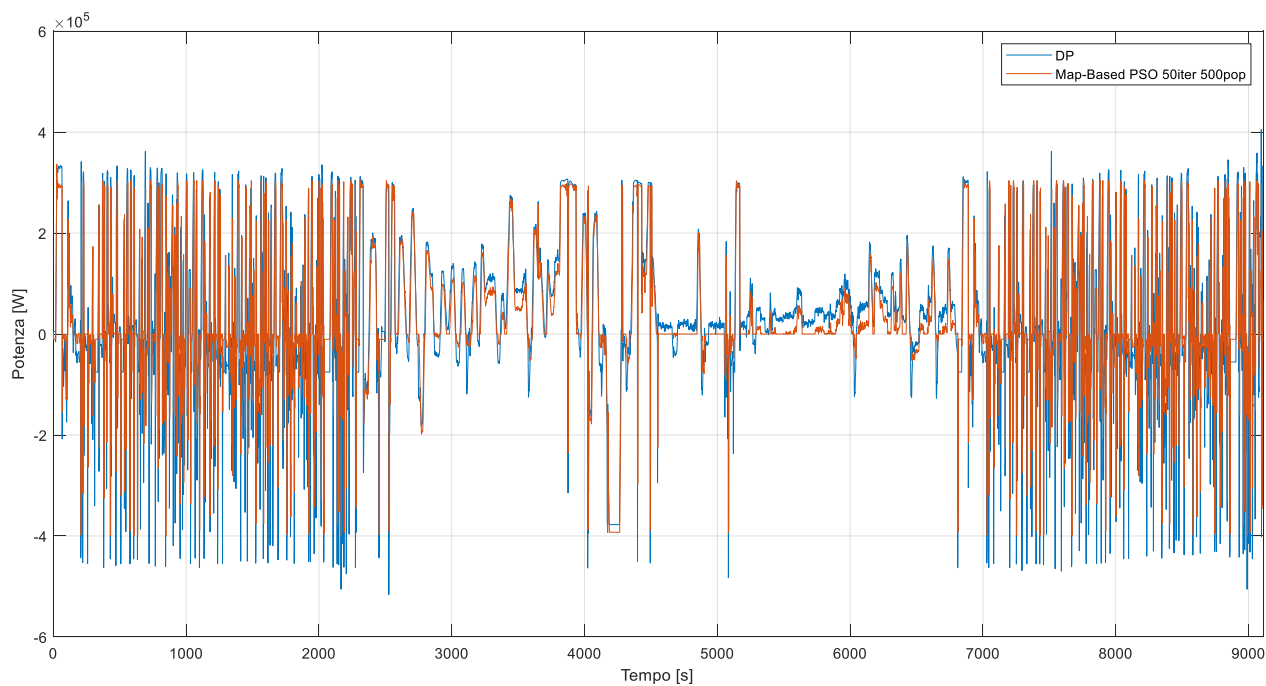


Figura 3.4.7: Profili di potenza richiesti alla batteria su ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

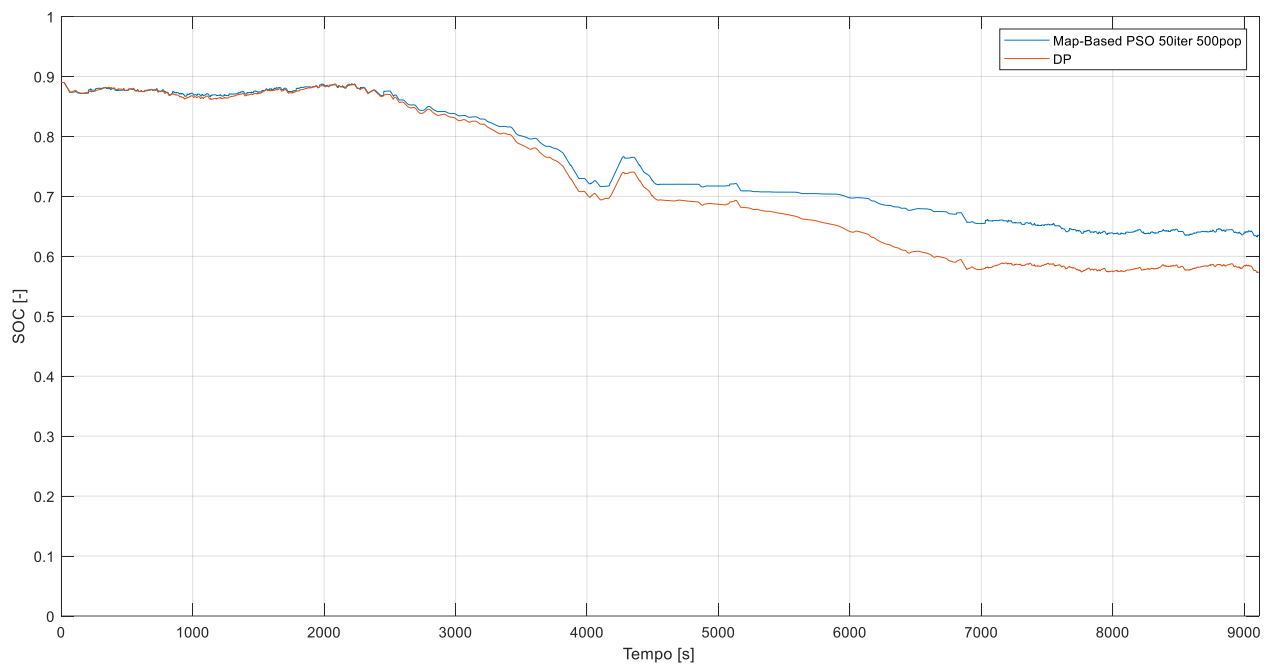


Figura 3.4.8: Profili di SOC su ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

Si riporta in figura 3.4.9 l’andamento dei profili di efficienza operativa della FC.

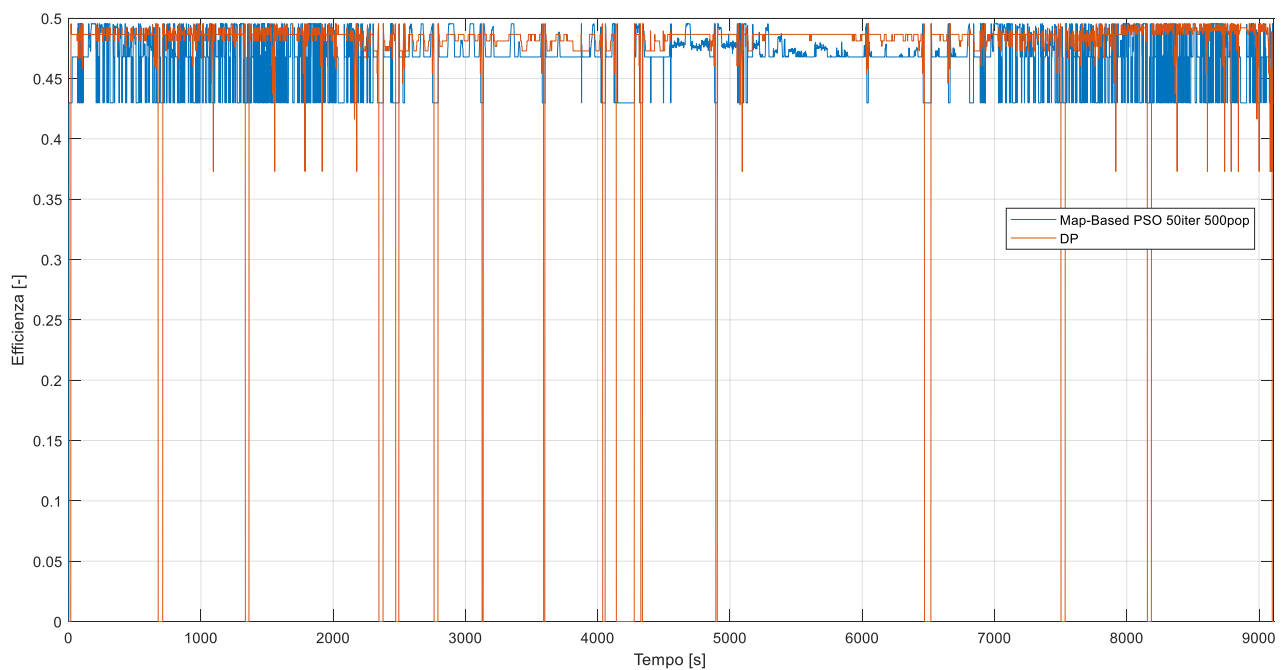


Figura 3.4.9: Profili di efficienza della FC su ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

Come si può osservare, la DP tende a spegnere frequentemente la FC lungo il ciclo guida e ad avere un comportamento analogo a quanto rilevato nel caso del ciclo CARB-Heavyduty. Essa si colloca inoltre su un livello di efficienza media pari a 0.48 mentre la MB pari a 0.47. Non vi

è cioè grande differenza a livello di efficienza media della FC. Si riporta invece in figura 3.4.10 l'andamento dei profili di consumo istantaneo di Idrogeno.

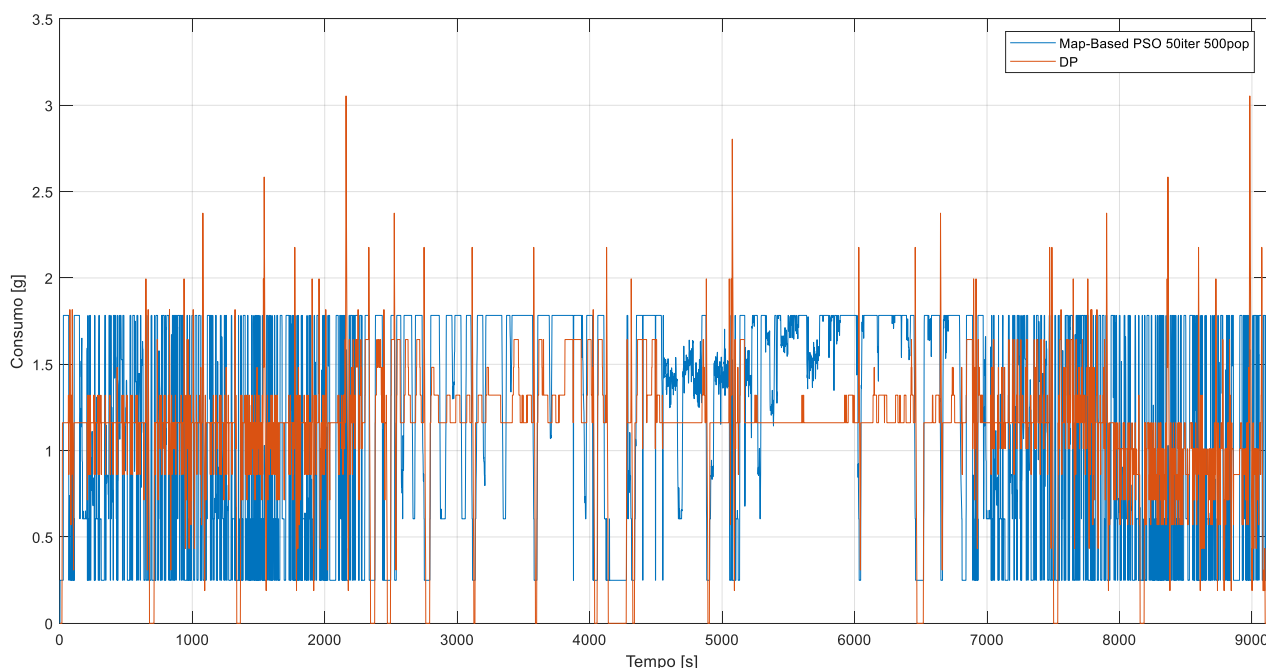


Figura 3.4.10: Andamenti del consumo istantaneo di Idrogeno su ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

Come si può osservare esistono istanti in cui il consumo istantaneo della DP si pone al di sopra di quello ottenuto con la MB ma in generale la banda di consumi ha ampiezza minore rispetto a quella della MB ed è spostata a valori inferiori. A livello medio la DP è caratterizzata da un consumo istantaneo pari a 1.12g mentre la MB pari a 1.18g. Ciò determina un consumo finale da parte della MB superiore rispetto a quello ottenuto mediante la DP.

Considerando ora il ciclo guida Regional+Urban si riporta in primo luogo il confronto tra i profili di potenza richiesti alla FC da parte delle due strategie di controllo in figura 3.4.11. Come si può ben vedere, analogamente a quanto ottenuto con il ciclo Urban+LongHawl+Urban, la DP opera la FC in un *range* di potenze di entità ridotta rispetto alla MB e ad un valore medio di potenza inferiore. Inoltre la DP tende a spegnere frequentemente la FC, anche con frequenza maggiore rispetto al ciclo Urban+LongHawl+Urban. Osservando poi i profili di potenza richiesta alla batteria riportati in figura 3.4.12 si nota come la DP tenda a richiedere valori di potenza leggermente superiori e a ricaricare la medesima con maggiore potenza rispetto alla MB. Ciò si traduce chiaramente nei profili di SOC riportati in figura 3.4.13. Come si può vedere la DP tende ad impiegare maggiormente la batteria e perciò il suo valore di SOC al termine del ciclo è inferiore rispetto alla MB. I profili qui riportati hanno comunque una forma ed andamento similare pur distaccandosi progressivamente.

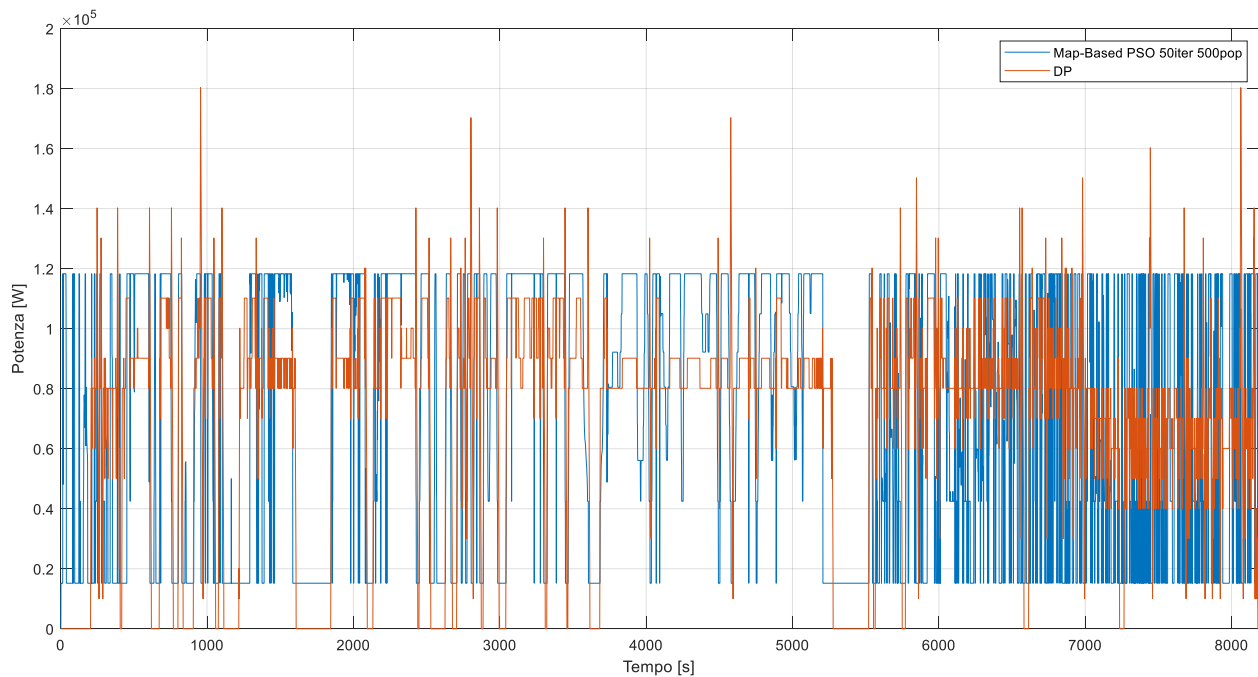


Figura 3.4.11: Profili di potenza richiesta alla FC su ciclo guida “Regional+Urban”.

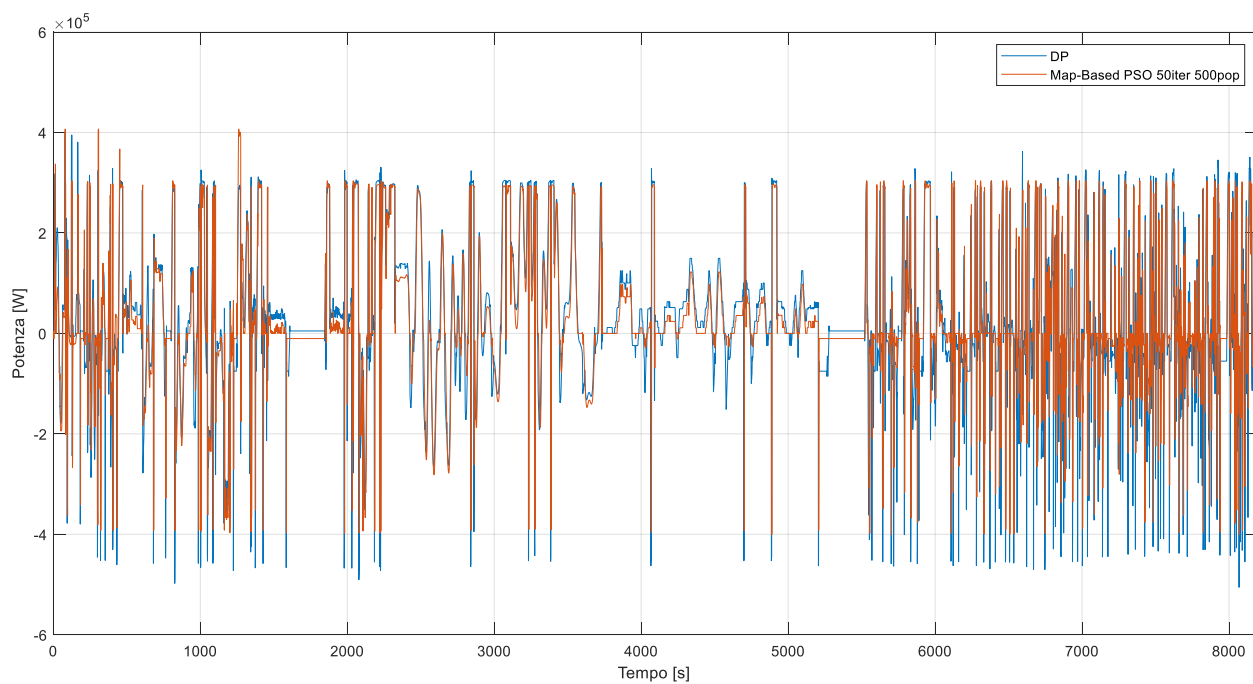


Figura 3.4.12: Profili di potenza richiesti alla batteria su ciclo guida “Regional+Urban”.

Si riporta poi in figura 3.4.14 l’andamento dei profili di efficienza della FC. Come si può notare, è possibile effettuare delle considerazioni analoghe rispetto al caso del ciclo Urban+LongHawl+Urban. In particolare, nel caso in esame, la DP ha un’efficienza media pari a 0.48 mentre la MB ottiene un’efficienza media pari a 0.46.

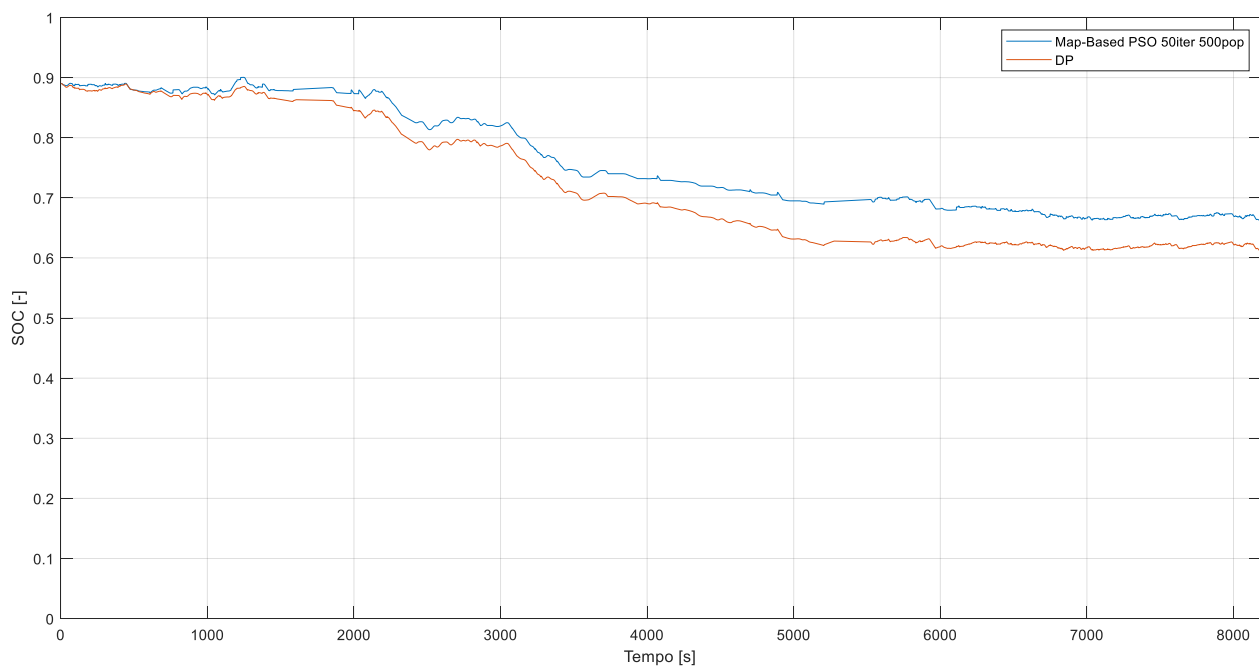


Figura 3.4.13: Profili di SOC lungo il ciclo guida “Regional+Urban”.

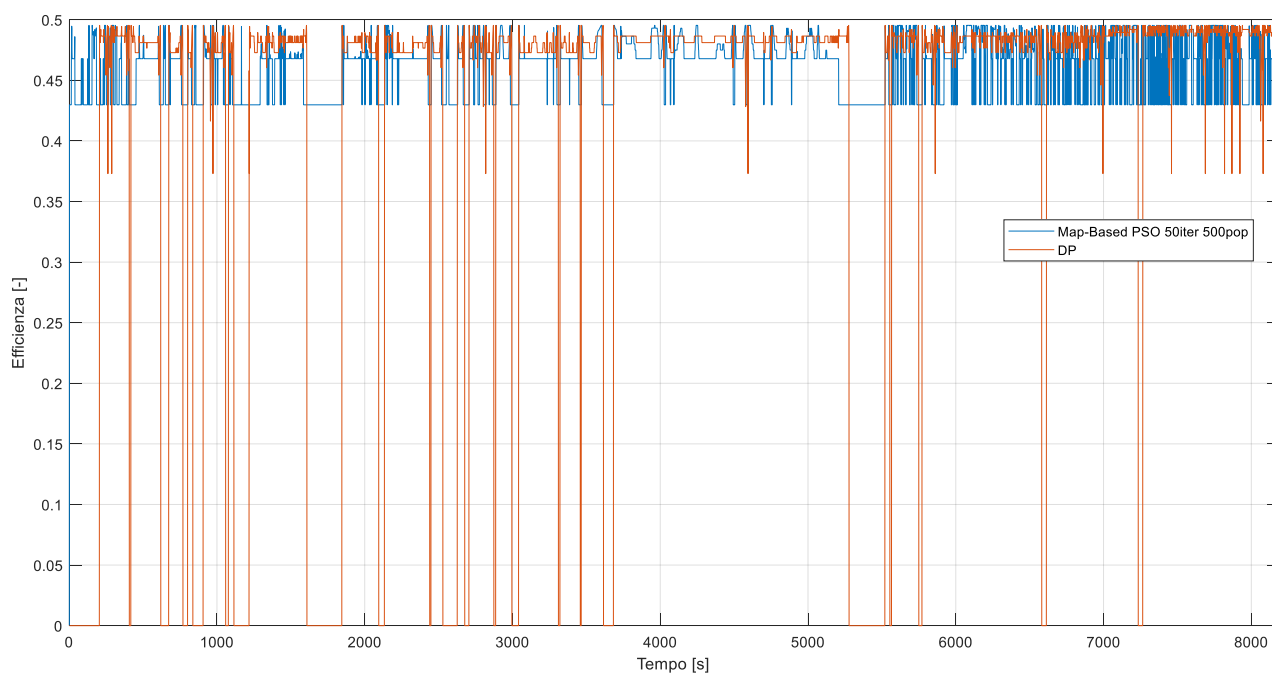


Figura 3.4.14: Profili di efficienza della FC su ciclo guida “Regional+Urban”.

In conclusione si riporta in figura 3.4.15 l’andamento dei profili di consumo istantaneo d’Idrogeno. Esistono anche nel caso in esame sporadici istanti in cui la DP opera la FC consumando istantaneamente più della MB ma, a livello generale il consumo istantaneo medio della DP è pari a 1.03g mentre quello della MB è pari a 1.08g. Ciò determina un consumo finale d’Idrogeno da parte della MB superiore rispetto a quello dato dalla DP.

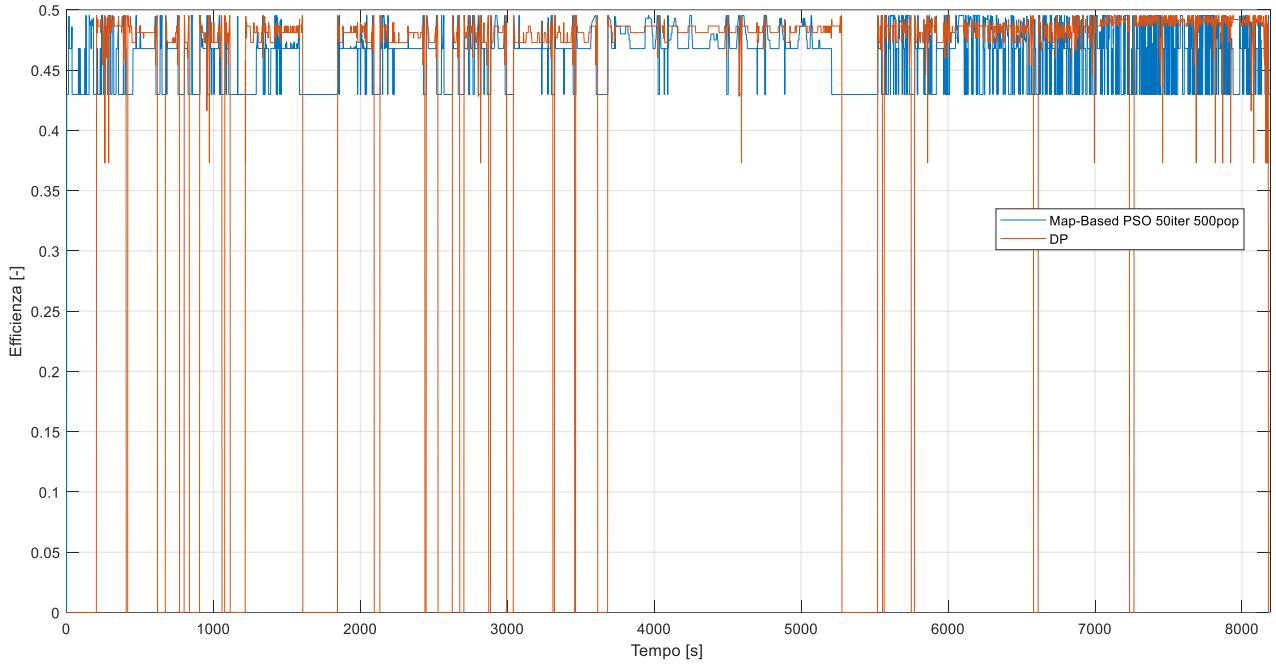


Figura 3.4.15: Profili di consumo istantaneo d’Idrogeno su ciclo guida “Regional+Urban”.

Risulta ora opportuno effettuare una considerazione relativa al consumo d’Idrogeno. Com’è infatti evidente le due strategie di controllo portano su tutti i cicli considerati all’ottenimento di valori di SOC finali differenti poiché utilizzano *powersplits* tra la FC e il pacco batterie differenti. Un banale confronto tra i consumi d’Idrogeno al termine del ciclo guida senza ulteriori analisi non avrebbe quindi alcun senso poiché è necessario tenere in conto la differenza di SOC terminale poc’anzi citata. Ragionando in termini di contenuto energetico dell’Idrogeno è possibile calcolare il *consumo equivalente* di Idrogeno dovuto alla differenza di SOC finale secondo l’equazione 3.4.1.

$$H2_{eqv} = \frac{\Delta SOC * Q0_J}{\eta_{FC,mean} * LHV_{H2}} \quad (3.4.1)$$

In essa $Q0_J$ è la capacità della batteria in Joule, $\eta_{FC,mean}$ è l’efficienza della FC operata tramite la strategia MB e mediata sul ciclo esclusivamente negli istanti di funzionamento della FC mentre LHV_{H2} è il potere calorifico inferiore dell’Idrogeno espresso in Joule al grammo. Nel caso in cui il SOC finale della DP sia superiore a quello della MB tale consumo equivalente è da aggiungere al consumo finale della MB e viceversa. Tenendo conto della presente considerazione è effettivamente possibile effettuare un confronto fondato tra i risultati della strategia DP e della strategia MB, i cui risultati fondamentali sono riassunti nella tabella 3.4.1.

Tabella 3.4.1. Risultati del confronto tra le strategie di controllo DP e MB.

Parametro	CARB-Heavyduty	Urban+LongHawl+Urban	Regional+Urban
SOC finale MB [-]	0.07	0.64	0.67
SOC finale DP [-]	0.15	0.57	0.61
Consumo MB [kg]	30.41	10.79	8.82
Consumo DP [kg]	27.95	10.25	8.43
Efficienza media FC			
MB [-]	0.45	0.47	0.46
Efficienza media FC DP			
[-]	0.49	0.48	0.48
Consumo equivalente			
MB [kg]	+0.97	-0.83	-0.72
Consumo totale MB			
[kg]	31.38	9.96	8.10
Consumo MB			
[kg/100km]	7.59	6.83	6.52
Consumo DP			
[kg/100km]	6.76	7.03	6.78

Come si può notare dalla tabella 3.4.1 il consumo finale della MB tenendo conto del consumo equivalente risulta essere leggermente inferiore rispetto a quello della DP. Tale risultato, che potrebbe sembrare ingiustificabile da un punto di vista teorico, è imputabile al fatto che la DP è stata fatta operare in ambiente Matlab e quindi con un modello numerico diverso rispetto a Simulink. Infatti, operando il modello Simulink con il profilo di potenza risultante dalla DP, si ottengono dei profili di SOC che terminano a valori leggermente più elevati, come visibile nelle figure 3.4.16 e 3.4.17. In tal maniera il consumo equivalente di Idrogeno si riduce nettamente, conducendo ai risultati esposti in tabella 3.4.2. Inoltre è anche necessario considerare che la DP ha operato con un *constraint* sull'autonomia da garantire e che, per come è strutturata, la strategia MB non può considerare anche alla luce del fatto che essa rappresenta una strategia applicabile in condizioni *real-time* senza conoscere a priori il profilo del ciclo guida.

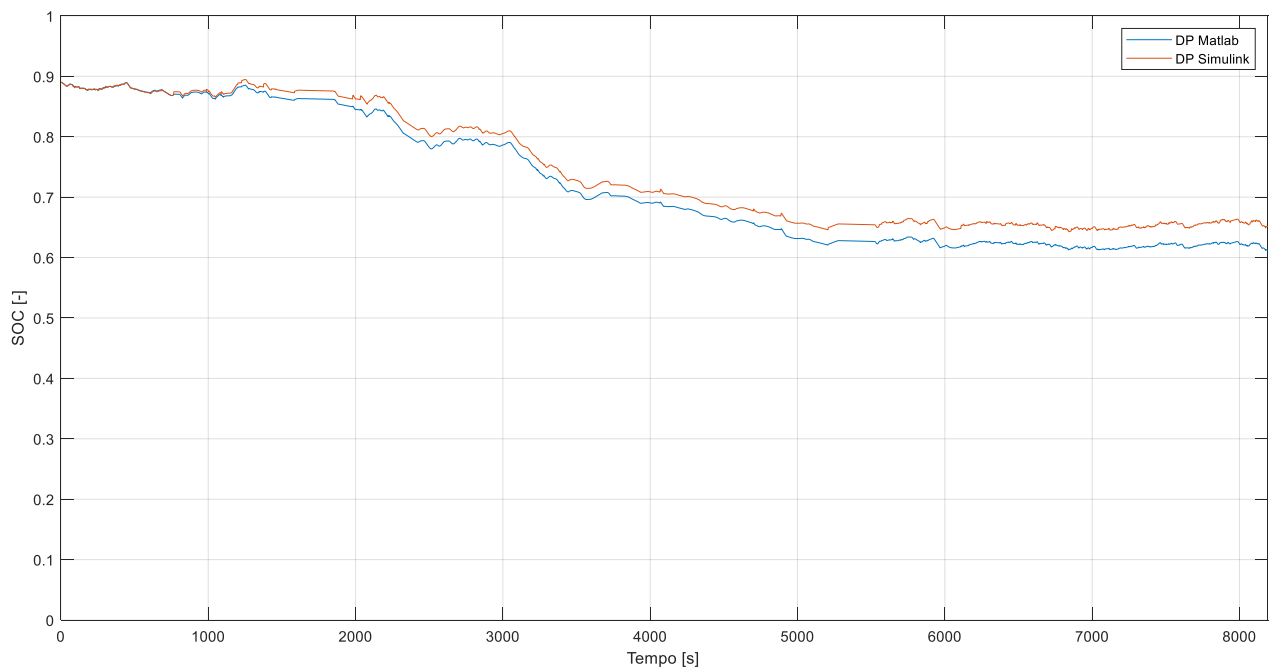


Figura 3.4.16: Confronto tra i profili di SOC risultanti dalla simulazione Matlab e Simulink per il ciclo guida “Regional+Urban”.

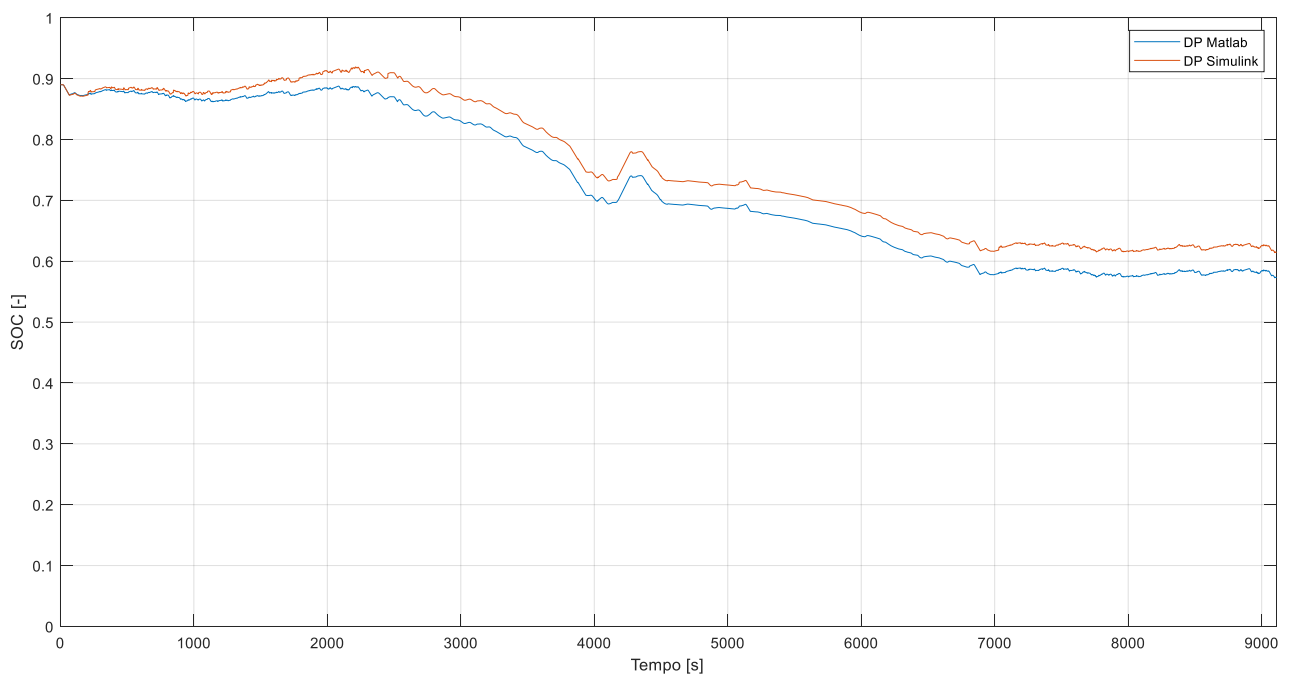


Figura 3.4.17: Confronto tra i profili di SOC risultanti dalla simulazione Matlab e Simulink per il ciclo guida “Urban+LongHawl+Urban”.

Tabella 3.4.2. Risultati del confronto tra le strategie di controllo DP e MB.

Parametro	Urban+LongHawl+Urban	Regional+Urban
SOC finale MB [-]	0.64	0.67
SOC finale DP [-]	0.61	0.65
Consumo equivalente		
MB [kg]	-0.35	-0.24
Consumo totale MB		
[kg]	10.44	8.58
Consumo MB		
[kg/100km]	7.16	6.91

E' quindi possibile notare come la DP presenti un consumo mediato pari a 6.86kg di Idrogeno ogni 100km percorsi mentre la MB un consumo pari a 7.22kg di Idrogeno ogni 100km percorsi. Ciò significa che la strategia MB così implementata nel modello ed ottimizzata mediante PSO presenta un consumo mediato superiore rispetto alla DP di una percentuale pari al **5.25%**. Tale risultato conferma per altro quanto esposto in [4], laddove la MB era caratterizzata da una percentuale di superiorità del proprio consumo d'Idrogeno rispetto ad una GOS oscillante tra il 4% ed il 9% sui cicli guida considerati.

4 – Conclusioni

Gli scopi del presente lavoro di tesi, come citato nell'introduzione, sono stati rappresentati dalla realizzazione di un modello di veicolo FCHEV, dall'individuazione ed implementazione di una strategia di controllo con caratteristiche che le permettano di funzionare su una reale ECU senza problemi e dalla sua relativa ottimizzazione. Tali fini sono stati efficacemente raggiunti mediante le procedure illustrate nei capitoli precedenti.

Nel presente lavoro di tesi si è infatti realizzato un solido modello Simulink utile alla simulazione del comportamento di un veicolo FCHEV "virtuale". Le sue caratteristiche ne permetteranno una facile modifica da parte di utenti ulteriori. In particolare potrà essere certamente interessante ed utile integrare nel modello in esame tutti gli aspetti legati al *Thermal Management* del *Fuel-cell system* sviluppato e modellato in Simulink dalla mia collega Ilaria Principe. La strategia rinvenuta in letteratura ed ottimizzata mediante algoritmi PSO dimostra un ottimo comportamento in termini di consumo d'Idrogeno rispetto al caso ottimale dato dalla DP. Inoltre il suo fine originario, e cioè il mantenimento di un'elevata efficienza operativa della FC su vari cicli guida, è stato preservato a valle delle modifiche e dell'ottimizzazione svolta. Come si è infatti potuto vedere dai risultati delle simulazioni, in tutti i cicli considerati la FC è operata dalla strategia MB ad elevata efficienza, con valori medi pressoché identici tra le missioni guida. Vista la relativa semplicità e duttilità della presente strategia di controllo rispetto a modifiche esterne, sarà facilmente ri-calibrabile o modificabile in futuro da chi lo riterrà opportuno.

Lista dei simboli

ICE – *Internal Combustion Engine*, motore a combustione interna;

FC – *Fuel-Cell*;

FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle*, veicolo elettrico impiegante le *fuel-cells*;

FCHEV – *Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle*, veicolo elettrico ibrido impiegante le *fuel-cells*;

AFC – *Alkaline Fuel-Cell*, tipologia di *fuel-cell*;

PEMFC – *Proton Exchange Membrane Fuel-Cell*, tipologia di *fuel-cell*;

PAFC – *Phosphoric Acid Fuel-Cell*, tipologia di *fuel-cell*;

MCFC – *Molten Carbonate Fuel-Cell*, tipologia di *fuel-cell*;

SOFC – *Solid Oxide Fuel-Cell*, tipologia di *fuel-cell*;

DMFC – *Direct Methanol Fuel-Cell*, tipologia di *fuel-cell*;

HD – *Heavy Duty*, tipologia di veicolo indicante un mezzo pesante per il trasporto di oggetti;

CS – *Control Strategy*, strategia di controllo impiegata in un veicolo ibrido;

PSO – *Particle Swarm Optimization*, particolare algoritmo di ottimizzazione;

EMS – *Energy Management System*, sistema di gestione dell'energia di un veicolo implementato nella sua centralina elettronica;

ECU – *Electronic Control Unit*, centralina elettronica di un veicolo;

GOS – *Global Optimization Strategy*, tipologia di strategia di controllo;

SOS – *Static Optimization Strategy*, tipologia di strategia di controllo;

HCT – *Heuristic Control Techniques*, tipologia di strategie di controllo;

DP – *Dynamic Programming*, particolare strategia di controllo afferente all'ambito delle GOS;

ECMS – *Equivalent Consumption Minimization Strategy*, particolare strategia di controllo afferente all'ambito delle SOS;

λ – *Equivalence Factor*, parametro caratteristico della strategia ECMS;

H_i – Potere calorifico inferiore del combustibile in [J/g];

m_{eqv} – Consumo equivalente di combustibile in [g];

m_{FC} – Consumo di Idrogeno da parte della *fuel-cell* in [g];

m_{BA} – Consumo di Idrogeno “equivalente” da parte della batteria in [g];

A-ECMS – *Adaptive ECMS*, particolare variante della strategia ECMS;

SOC – *State of Charge*, livello di carica del pacco batterie, espresso come un numero variabile tra 0 ed 1;

FES – *Fuel Efficient Strategy*, strategia di controllo afferente all'ambito delle SOS;

λ_0 – *Weighing Factor*, parametro caratteristico della strategia di controllo FES;

RBCS – *Rule Based Control Strategy*, tipologia di strategia di controllo relativa all’ambito delle HCT;

SOE – *State of Energy*, livello di energia di un sistema, espresso come un numero variabile tra 0 ed 1;

SOH – *State of Health*, livello di salute di un sistema, espresso come un numero variabile tra 0 ed 1;

ESS – *Energy Storage System*, sistema di stoccaggio dell’energia a bordo del veicolo;

MPC – *Model Predictive Control*, tecnica di controllo utilizzata alla base di alcune strategie di controllo;

ESSS – *Energy Storage System Scheduler*, controllore dell’ESS;

RBS – *Rule Based Strategy*, sinonimo di RBCS;

ALS – *Adaptive Load Strategy*, particolare strategia di controllo;

FCS – *Fuel-Cell System*, sistema comprendente le *fuel-cells*;

TMS – *Thermal Management System*, sistema di controllo della temperatura;

BLFS – *Bounded Load Following Strategy*, particolare strategia di controllo;

WLTC - *Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles*, ciclo guida;

CYC_WVUINTER - *West Virginia Interstate Driving Schedule*, ciclo guida;

C_r – Coefficiente di resistenza al rotolamento degli pneumatici;

C_d – Coefficiente di resistenza aerodinamica del veicolo;

g – Accelerazione di gravità in $[m/s^2]$;

β – Angolo di inclinazione del terreno in $[deg]$;

r_{dyn} – Raggio dinamico delle ruote del veicolo in $[m]$;

ω_{mot} – Velocità angolare di rotazione dell’albero motore in $[rad/s]$;

τ – Rapporto di trasmissione;

η_{gear} – Efficienza della trasmissione;

ω_{wheels} – Velocità angolare di rotazione delle ruote in $[rad/s]$;

F – Forze di resistenza all’avanzamento del veicolo in $[N]$;

a_{eff} – Accelerazione effettiva del veicolo in $[m/s^2]$;

$V_{batteria}$ – Tensione elettrica della batteria in $[V]$;

$R_{batteria}$ – Resistenza elettrica della batteria in $[Ohm]$;

$I_{batteria}$ – Corrente elettrica della batteria in $[A]$;

LHV_{H2} – Potere calorifico inferiore dell’Idrogeno in $[J/g]$;

η_{FC} – Efficienza della *fuel-cell*;

W_{FC} – Potenza richiesta alla *fuel-cell* in $[W]$;

NEDC – *New European Driving Cycle*, ciclo guida;

UDDS - *Urban Dynamometer Driving Schedule*, ciclo guida;

FTP-75 – *Federal Test Procedure 75*, ciclo guida;

HWFET - *Highway Fuel Economy Test Cycle*, ciclo guida;

η_B – Efficienza del convertitore elettronico di potenza di tipo *boost*;

MB – *Map Based Control Strategy*, particolare strategia di controllo RBCS;

PC – *Personal Computer*;

RAM – *Random Access Memory*, particolare memoria di un calcolatore elettronico;

ΔSOC – Differenza di SOC finale al termine del ciclo guida;

$H2_{eqv}$ – Consumo equivalente di Idrogeno in [g];

$Q0_J$ – Capacità della batteria in [J];

Bibliografia

- [1] – Yue M., Jemei S., Gouriveau R., Zerhouni N., Review on health-conscious energy management strategies for fuel cell hybrid vehicles: Degradation models and strategies. *International journal of hydrogen energy* 44, 2019, 6844-6861;
- [2] – Sulaiman N., Hannan M.A., Mohamed A., Ker P.J., Majlan E.H., Wan Daud W.R., Optimization of energy management system for fuel-cell hybrid electric vehicles: Issues and recommendations. *Applied Energy* 228, 2018, 2061–2079;
- [3] – Li H., Ravey A., N'Diaye A., Djerdir A., A novel equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor. *Journal of Power Sources* 395, 2018, 262–270;
- [4] – Feroldi D., Serra M., Riera J., Energy management strategies based on efficiency map for fuel cell hybrid vehicles. *Journal of Power Sources* 190, 2009, 387–401;
- [5] – Di S., Lim C-C., Shi P., Fuzzy model based control for energy management and optimization in fuel cell vehicles. *IEEE Transactions on vehicular technology*, VOL. 69, NO. 12, 2020, 14674-14688;
- [6] – Biswas A., Emadi A., Energy management Systems for Electrified Powertrains: State of the Art review and Future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VOL. 68, Issue: 7, 2019, 6453-6467;
- [7] – Sarioglu I.L., Klein O.P., Schroder H., Kukukai F., Energy management for fuel cell hybrid vehicles based on Specific Fuel Consumption due to Load shifting. . *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VOL. 13, NO.4, 2019, 1772-1781;
- [8] – Biswas A., Anselma P.G., Rathore A., Emadi A., Comparison of three real time implementable energy management strategies for multi mode electrified powertrain. *IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, 2020;
- [9] – Li H., Ravey A., N'Diaye A., Djeridir A., Equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor. *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016;
- [10] – Hemi H., Gohuili J., Cheriti A., A real time Fuzzy Logic power management strategy for a fuel cell vehicle. *Energy Conversion and Management* 80, 2014, 63–70;
- [11] – Kandidayeni M., Macias A., Boulon L., Kelowani S., Investigating the impact of ageing and thermal management of a fuel cell system on energy management strategies. *Applied Energy* 274, 2020, 115293;
- [12] – Bernard J., Delprat S., Guerra T.M., Buchi F.N., Fuel efficient power management strategy for fuel cell hybrid powertrains. *Control Engineering Practice* 18, 2010, 408–417;
- [13] – Teng T., Zhang X., Dong H., Xue Q., A comprehensive review of energy management optimization strategies for fuel cell passenger vehicle. *International journal of hydrogen energy* 45, 2020, 20293-20303;
- [14] – Vaschetto S., Rolando L., Appunti del corso di “Hybrid Propulsion Systems” – A.A.2020/2021. *Corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica presso il Politecnico di Torino*, 2020;

- [15] – Guzzella L., Sciarretta A., Vehicle Propulsion Systems – Introduction to Modelling and Optimization. *Ed. Springer*, 2005;
- [16] – Barbir F., PEM Fuel-Cells, Theory and Practice. Academic Press, Elsevier, 2013.

Sitografia

- [17] – Particle Swarm Optimization in Matlab - <https://yarpiz.com/50/ypea102-particle-swarm-optimization>;
- [18] – Vehicle Modeling using Simulink - <https://www.youtube.com/watch?v=J-JOn5xaZbQ>;
- [19] – Hybrid Vehicles modeling with Simulink - https://www.youtube.com/watch?v=J-JOn5xaZbQ&list=PLk5UJnVzB_KUZ2NBo4wtr0hEJPUvNOB_K;
- [20] – PSO Basics - <https://www.youtube.com/watch?v=sB1n9a9yxJk>;