

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ
DI BOLOGNA**

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

TESI DI LAUREA

in

**MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA E PROPULSORI
IBRIDI**

**ANALISI E SVILUPPO DI STRATEGIE PER
L'OTTIMIZZAZIONE DEL CONSUMO
ENERGETICO DI UNA VETTURA IBRIDA
ELETTRICA**

CANDIDATO:

Rocco Succi

RELATORE:

Chiar.mo Prof. Ing. Nicolò Cavina

CORRELATORI:

Dott. Ing. Edmondo Lanzillotta

Dott. Ing. Marco Pratesi

Dott. Ing. Giovanni Prodi

Anno Accademico 2017/2018

Sessione III

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare, in ordine cronologico, coloro che hanno reso possibile lo svolgimento di questo progetto di tesi.

Innanzitutto, ringrazio il Chiar.mo Prof. Ing. Nicolò Cavina che ha saputo cogliere in me l'interesse per la disciplina dei motori a combustione interna e dei propulsori ibridi e mi ha permesso di mettermi in contatto con i miei relatori in azienda. Inoltre, vorrei ringraziarlo per avermi seguito durante il mio progetto di tesi, fornendo sempre un riscontro utile al mio lavoro.

L'attività progettuale si è svolta presso Magneti Marelli POWERTRAIN S.p.A. Qui ho incontrato professionisti nel settore dei propulsori ibridi che hanno saputo accogliere pazientemente le mie conoscenze didattiche e aiutarmi a tramutarle in un progetto *general based* secondo il metodo di lavoro aziendale. Ringrazio specialmente l'Ing. Edmondo Lanzillotta, l'Ing. Marco Pratesi e l'Ing. Giovanni Prodi che mi hanno seguito durante i miei mesi di tirocinio e mi hanno sempre fornito un riscontro positivo insieme a tanti suggerimenti.

Infine, ringrazio la mia famiglia e i miei amici per il supporto costante mostratomi, che mi ha permesso di aggiungere ulteriore motivazione al mio lavoro.

A Renata, Andrea, Gina, Maria, Viola

Indice

1	Introduzione	19
1.1	Scenario globale	19
2	Definizione di un HEV	26
2.1	Vantaggi di un HEV	26
2.1.1	Grado di ibridizzazione	28
2.2	Topologia di un HEV	31
2.2.1	Ibrido in serie	31
2.2.2	Ibrido in parallelo	32
2.2.3	Misto	32
2.3	Architetture ibride	33
2.3.1	Fattore di split	35
2.4	Definizione del modello veicolo	35
2.4.1	Modello HEV	37
2.4.2	Veicolo	37
2.4.3	Differenziale	39
2.4.4	Cambio	40
2.4.5	Frizione	41
2.4.6	MCI	42
2.4.7	Macchina elettrica	43
2.4.8	Inverter	45
2.4.9	BSG	46
2.4.10	Batteria	47
3	Strategie per la gestione dell'energia in un HEV	50
3.1	Dynamic Programming	51
3.2	Formulazione di un problema di controllo ottimale	52
3.3	ECMS	54
3.3.1	Fattore di equivalenza	56
3.3.2	Implementazione in ECU	58
3.4	Strategia euristica	62
4	Risultati	65
4.1	Ciclo NEDC	66

4.1.1 Configurazione P3	67
4.1.1.1 SOC	67
4.1.1.2 Coppia all'EMG	70
4.1.1.3 Coppia del MCI	72
4.1.1.4 Potenza di batteria e consumo specifico	75
4.1.1.5 Risparmio energetico	76
4.1.2 Configurazione P1	77
4.1.2.1 SOC	77
4.1.2.2 Risparmio energetico	78
4.2 Ciclo WLTP	79
4.2.1 Configurazione P3	81
4.2.1.1 SOC	81
4.2.1.2 Coppia all'EMG	83
4.2.1.3 Risparmio energetico	86
5 Conclusioni e sviluppi futuri	88
Bibliografia	91

Sommario

Questo elaborato nasce dall'incontro dell'interesse per il settore automotive e la presa di coscienza riguardante il cambiamento climatico globalmente in atto.

Lo scopo è di fornire una trattazione utile a stimolare, nel suo piccolo, l'interesse verso l'adozione di una vettura ibrida elettrica rispetto ad una tradizionale vettura dotata di solo motore a combustione interna.

La struttura di questa tesi è composta dall'introduzione, nel Capitolo 1, in cui è evidenziato il cambiamento climatico in atto. Nei Capitoli 2 e 3 è fornita una definizione di HEV (Hybrid Electric Vehicle) e delle strategie di gestione energetica. Nel Capitolo 4 sono mostrati i risultati ottenuti dalle simulazioni sul software delle architetture P1 e P3 sui cicli di guida NEDC e WLTP e, infine, nel Capitolo 5 sono riportate le conclusioni.

Indice delle figure

<i>Figura 1 – Andamento della concentrazione di CO₂ in atmosfera</i>	20
<i>Figura 2 – Incremento del livello dei mari</i>	21
<i>Figura 3 – Emissioni di GHG secondo l'analisi WTW, BEV vs ICE, dati relativi al 2009</i>	23
<i>Figura 4 – Mappa di iso efficienza di un MCI</i>	27
<i>Figura 5 – Mappa di iso efficienza di un EMG</i>	28
<i>Figura 6 – HEV in serie</i>	31
<i>Figura 7 – HEV in parallelo</i>	32
<i>Figura 8 – Topologia HEV serie/parallelo</i>	33
<i>Figura 9 – Architetture per un parallel HEV</i>	34
<i>Figura 10 – Modello veicolo backward</i>	36
<i>Figura 11 – Modello HEV forward</i>	37
<i>Figura 12 – Forze agenti sul veicolo</i>	38
<i>Figura 13 – Mappa del consumo specifico per il MCI</i>	43
<i>Figura 14 – Mappa di potenza dissipata per una macchina elettrica</i>	45
<i>Figura 15 – Saturazione dinamica della coppia del BSG</i>	47
<i>Figura 16 – Circuito della batteria</i>	48
<i>Figura 17 – Fattore di equivalenza</i>	57
<i>Figura 18 – Implementazione della strategia di ECMS</i>	58
<i>Figura 19 – Script che traduce il modello Simulink in Matlab</i>	59
<i>Figura 20 – Validazione script - BSFC</i>	60
<i>Figura 21 – Validazione script - Potenza elettrica della batteria</i>	60
<i>Figura 22 – 2nd Level S-Function</i>	61
<i>Figura 23 – Inserimento del vettore di split</i>	61
<i>Figura 24 – Esempio di strategia euristica</i>	63
<i>Figura 25 – NEDC</i>	66
<i>Figura 26 – Profilo di cambio marce per il ciclo di guida NEDC</i>	67
<i>Figura 27 – SOC, NEDC, P3, ECMS vs euristica</i>	68
<i>Figura 28 – Scarica di SOC dovuta al GF</i>	69
<i>Figura 29 – Algoritmo di DP per la guida di un HEV sul NEDC</i>	70
<i>Figura 30 – EMG torque, NEDC, P3, ECMS vs euristica</i>	71
<i>Figura 31 – Coppia EMG, NEDC, dettaglio</i>	71

<i>Figura 32 – Coppia EMG, NEDC, dettaglio ciclo extra urbano</i>	72
<i>Figura 33 – Coppia del MCI, NEDC, P3, ECMS vs euristica</i>	73
<i>Figura 34 – Coppia del MCI, NEDC, dettaglio ciclo urbano</i>	73
<i>Figura 35 – Coppia del MCI, NEDC, dettaglio ciclo extraurbano</i>	74
<i>Figura 36 – Potenza alla batteria, NEDC, P3, ECMS vs euristica</i>	75
<i>Figura 37 – Consumo specifico, P3, NEDC, ECMS vs euristica</i>	75
<i>Figura 38 – SOC, WLTP, P1, ECMS vs Euristica</i>	77
<i>Figura 39 – WLTP</i>	80
<i>Figura 40 – Profilo di cambio marce per il ciclo di guida WLTP</i>	80
<i>Figura 41 – SOC, WLTP, ECMS vs euristica</i>	81
<i>Figura 42 – SOC, WLTP, dettaglio a basse velocità</i>	82
<i>Figura 43 – SOC, WLTP, dettaglio velocità medio elevate</i>	83
<i>Figura 44 – Coppia EMG, WLTP</i>	83
<i>Figura 45 – Coppia EMG, WLTP, basse velocità</i>	84
<i>Figura 46 – Coppia EMG, WLTP, medie velocità</i>	84
<i>Figura 47 – Coppia EMG, WLTP, alte velocità</i>	85

Indice delle tabelle

<i>Tabella 1 - Comparativa di architetture ibride</i>	30
<i>Tabella 2 - Consumi ECMS, NEDC, P3</i>	76
<i>Tabella 3 - Consumi ECMS, NEDC, P1</i>	78
<i>Tabella 4 - Caratteristiche WLTP</i>	79
<i>Tabella 5 - Consumi ECMS, WLTP, P3</i>	86

Nomenclatura

Acronimo	Descrizione
BEV	Battery Electric Vehicle
BSG	Belt Starter Generator
DP	Dynamic Programming
EB	Electric Boost
ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy
ECU	Centralina di controllo elettronico
EMG	Electric Motor/Generator
EMS	Energy Management Strategy
EREV	Extended Range Electric Vehicle
ESA	European Space Agency
EV	Electric Vehicle
FC	Fuel Consumption
GF	Gap Filling
GI	Grado di Ibridizzazione
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HV	Hybrid Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine

IMBIE	Ice sheet Mass Balance Inter-comparison Exercise
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISG	Integrated Starter Generator
LCA	Life Cycle Assessment
MCI	Motore a Combustione Interna
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle
MT	Manual Transmission
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEDC	New European Driving Cycle
PE	Power Electronics
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PMP	Pontryagin's Minimum Principle
QSS	Quasi Static Simulation
TTW	Tank to wheel
UNEP	United Nations Environment Program
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure
WTW	Well to wheel

Simbolo	Descrizione	Unità di misura
C_0	Coefficiente di attrito relativo alla forza peso del veicolo	$[-]$
C_1	Coefficiente di attrito al rotolamento	$[-]$
C_2	Coefficiente di attrito aerodinamico	$[-]$
F_j	Forza del j-esimo componente	$[N]$
H	Hamiltoniana	$[kW]$
I_{batt}	Corrente della batteria	$[A]$
I_{ph}	Corrente di fase	$[A]$
J	Funzione di costo	$[-]$
P_j	Potenza del componente j-esimo	$[W]$
Q_{LHV}	Potere calorifico inferiore	$[MJ/Kg]$
Q_{nom}	Capacità nominale della batteria	$[Ah]$
R_j	Resistenza del componente j-esimo	$[Ohm]$
SOC	Stato di carica	$[\%]$
SOC_{min}	Minimo stato di carica	$[\%]$
SOC_{max}	Massimo stato di carica	$[\%]$
SOC_{ref}	Stato di carica di riferimento	$[\%]$
T_j	Coppia del j-esimo componente	$[Nm]$
V_{OC}	Tensione a circuito aperto	$[V]$

r_j	Raggio dell'elemento j-esimo	[m]
v	Velocità del veicolo	[m/s]
u	Fattore di split della coppia	[-]
η	Efficienza	[-]
λ	Variabile di costato	[-]
ξ	Stato di carica della batteria	[%]
τ	Rapporto di trasmissione	[-]
σ	Fattore di equivalenza	[-]
ω_j	Velocità angolare dell'elemento j-esimo	[rad/s]

Capitolo 1

Introduzione

In questo capitolo sono illustrate le evidenze scientifiche riguardanti il cambiamento climatico in atto.

1.1 Scenario globale

Nel corso degli ultimi 500 milioni di anni diverse leggere deviazioni dell'orbita terrestre hanno variato la quantità di energia solare assorbita dalla superficie terrestre. Questo fenomeno in alcuni casi ha causato una diminuzione delle temperature, portando ad un'Era Glaciale. La conseguenza di ogni Era Glaciale nella storia terrestre è stata la riduzione a livello globale di piante e animali. Le prime, in particolare, sono da sempre fondamentali per il corretto sostentamento dell'equilibrio di un ecosistema in quanto hanno il compito, durante la fotosintesi, di assorbire diossido di carbonio dall'atmosfera e di rilasciare ossigeno. L'assorbimento di CO₂ è un fattore cruciale per l'equilibrio di un ecosistema, infatti esso è uno dei gas responsabili dell'effetto serra.

Durante ogni glaciazione l'abbassamento di temperature ha fatto sì che le piante faticassero maggiormente a riprodursi, diminuendo quindi l'assorbimento globale di diossido di carbonio dall'atmosfera. La conseguenza naturale è stata l'incremento della temperatura media globale, sino al punto in cui è stato raggiunto un nuovo equilibrio. Questo ciclo si è ripetuto almeno cinque volte [1]. Tuttavia, nella storia più recente dell'uomo, la concentrazione di CO₂ sta sperimentando un picco ben al di sopra della media storica.

Non è un caso, ed esistono numerosi studi a comprovarlo, che l'incremento di CO₂ è direttamente imputabile alle attività antropogene. L'aumento della temperatura media globale ha avuto inizio alla fine del XIX secolo e da allora è incrementato di 0,9°C.

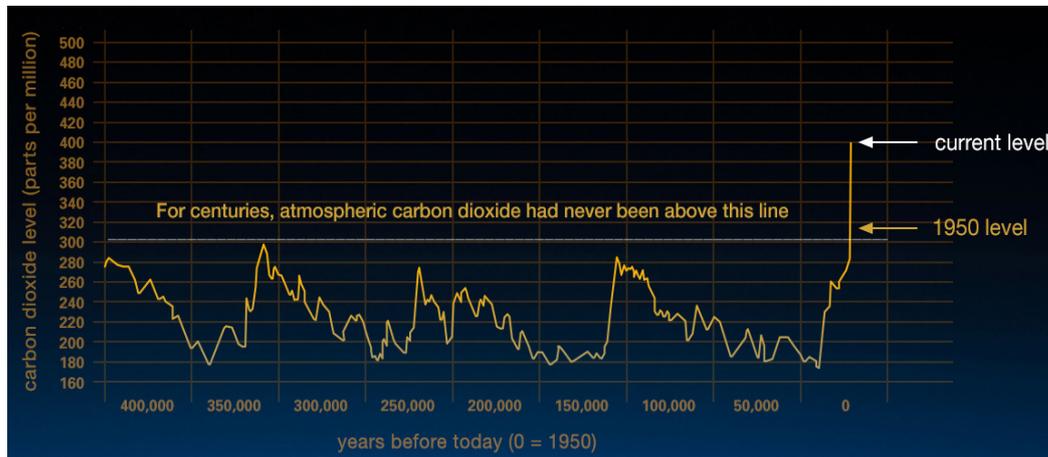


Figura 1 – Andamento della concentrazione di CO₂ in atmosfera

Secondo le rilevazioni tramite carote di ghiaccio l'inizio dell'anomalia termica corrisponde all'avvio dell'attività industriale sul continente europeo, durante la quale si cominciarono ad utilizzare grandi quantità di carbone come combustibile per l'alimentazione dei motori a vapore.

Negli ultimi anni si è registrato un aumento di temperatura degli oceani, che hanno sempre assolto il compito di ammortizzatore termico e che ora si stanno saturando, per cui vanno a sottrarre a loro volta calore alle calotte artiche. Queste rappresentano l'unica riserva di ghiaccio a livello mondiale e negli ultimi anni si sta registrando un elevato tasso di scioglimento. Il risultato è l'innalzamento del livello degli oceani. In Figura 2 sono riportati i dati sull'innalzamento del livello dei mari, ottenuti dalle misure dirette tra il 1992 e il 2017, secondo lo studio condotto da *Ice Sheet Mass Balance Inter-Comparison Exercise* (IMBIE) [2], considerata una delle più autorevoli collaborazioni tra scienziati polari e supportato dalla collaborazione tra NASA ed ESA.

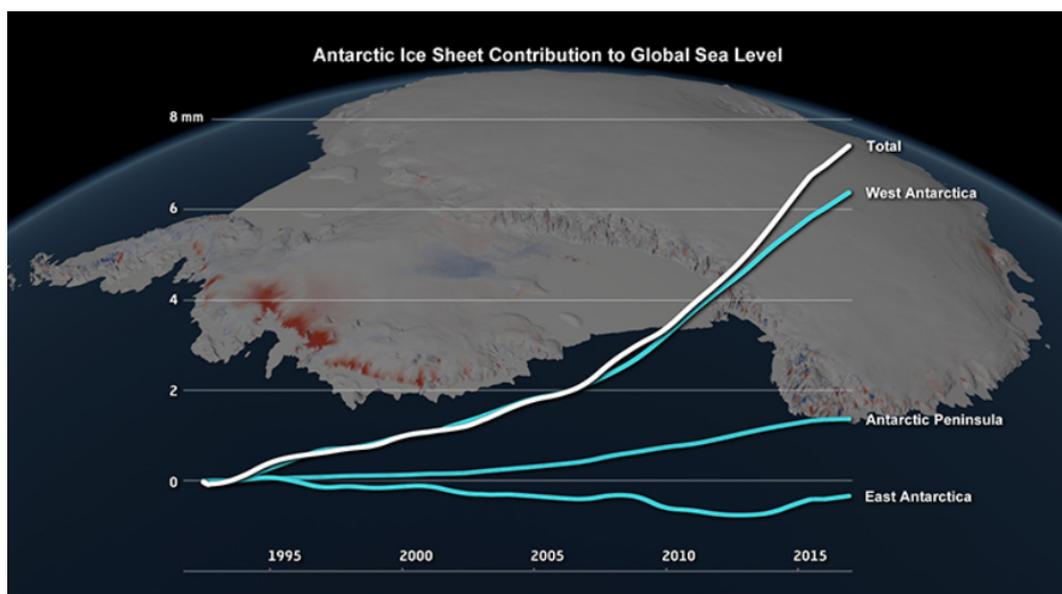


Figura 2 - Incremento del livello dei mari

Da cui si evince come questo tasso di incremento del livello degli oceani sia il più alto degli ultimi 25 anni.

Fenomeni naturali estremi e temperature oltre la media stanno diventando una costante negli ultimi anni. Il 2018 è stato il quarto anno di fila a battere il record per temperature più alte [13] che hanno causato incendi di vaste dimensioni in Grecia e in California, mentre il Nord America è stato colpito da inondazioni, uragani e un vortice polare che ha portato le temperature ben al disotto dei minimi storici.

Il settore dei trasporti è responsabile di circa un quarto delle emissioni globali di CO₂.

Il più importante trattato riguardante un accordo globale sul contenimento delle emissioni responsabili del riscaldamento globale è il Paris Agreement, concordato a Parigi nel dicembre 2015 durante la COP 21 [3]. L'accordo, i cui provvedimenti saranno effettivi a partire dal 2020, prevede un contenimento dell'aumento di temperatura rispetto ai livelli preindustriali "ben al di sotto" della soglia critica di 2°C (oltre la quale sono previsti

cambiamenti irreversibili per il clima e l'ambiente), perseguendo l'impegno di limitare l'aumento a 1,5 °C.

Seguendo queste direttive il Parlamento Europeo ha approvato la normativa riguardante il contenimento delle emissioni medie *tank to wheel* di un costruttore sulla propria flotta di veicoli. Il limite imposto è di 95 gCO₂/km, con decorrenza da fine 2020. La stessa normativa prevede dei bonus per chi decide di elettrificare o ibridizzare i propri veicoli, attribuendo dei coefficienti per ogni vettura ibrida prodotta [4].

Secondo l'ultimo rapporto dell'IPCC [5] è necessario “adottare cambiamenti rapidi, su vasta scala e senza precedenti, in tutti gli aspetti della società”. Lo studio più recente condotto da questo ente riporta che per contenere l'aumento di temperature a 1,5 °C è necessario abbattere i livelli di CO₂ nel 2030 del 45% rispetto ai livelli del 2010, sino a raggiungere un'emissione pari a zero nel 2050 e procedere con l'estrazione del CO₂ dall'atmosfera negli anni successivi.

Infine, nell'ultimo resoconto dell'UNEP (United Nations Environment Programme) è emerso che i livelli di CO₂ sono tornati a crescere nel 2017, dopo tre anni di stabilizzazione [6]. Sulla base delle ultime misurazioni, i calcoli mostrano che:

1. Per soddisfare i limiti posti dall'Accordo di Parigi gli sforzi attuali non sono sufficienti: Per centrare l'obiettivo di 1,5 °C bisogna quintuplicare gli sforzi attuali entro il 2030, mentre bisogna triplicarli nel caso dei 2 °C.
2. I livelli di CO₂ nel 2030 devono essere compresi tra il 25% e il 55% rispetto ai livelli del 2017, in cui si è registrato un nuovo massimo, senza ancora un segnale di inversione di tendenza.

È chiaro che in questo contesto una vettura completamente elettrica viene incontro facilmente agli obiettivi di riduzione di CO₂, con un'emissione *tank to wheel* (TTW) pari a zero. Eseguendo un'analisi completa, ovvero considerando la modalità con cui l'energia è prodotta sin dalla sorgente (energia elettrica per le vetture elettriche, combustibile fossile per le vetture con motore a combustione interna) fino al trasporto sulla vettura e l'utilizzo su strada (*well to wheel*, WTW) e il ciclo di vita dei materiali (*Life Cycle Assessment*, LCA) si ottiene che il risparmio in grammi di CO₂ equivalente di una vettura elettrica a batteria rispetto ad un tradizionale motore a combustione interna varia tra il 31% al 46% [14, 15, 16].

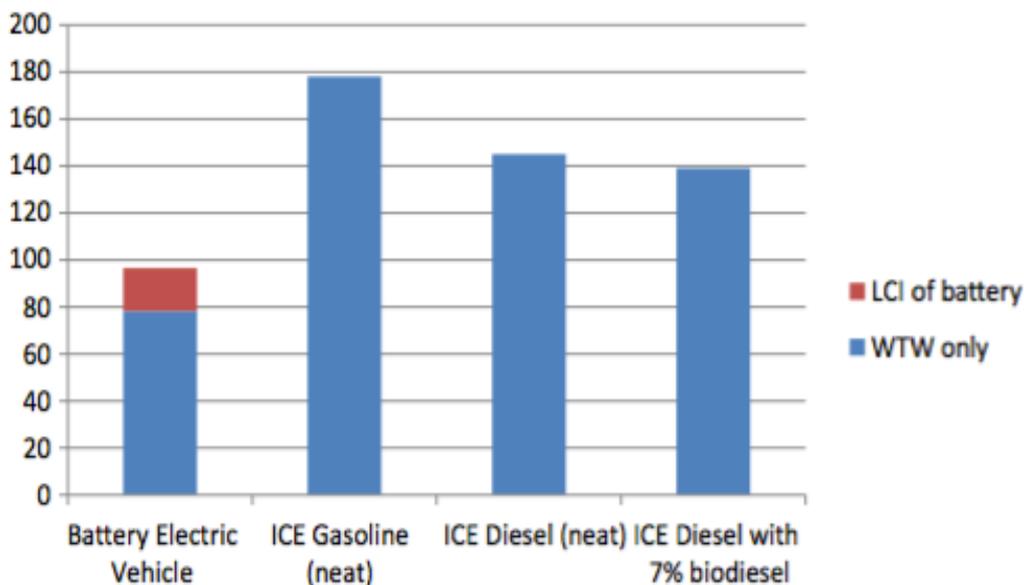


Figura 3 - Emissioni di GHG secondo l'analisi WTW, BEV vs ICE, dati relativi al 2009

Attualmente la soluzione più conveniente dal punto di vista dei costi per mitigare l'emissione di CO₂ è quella di una vettura ibrida elettrica [17]. Per tale motivo in questa trattazione il modello di riferimento è quello di una vettura ibrida elettrica.

Insieme alla definizione delle possibili architetture ibride sono state studiate in letterature diverse ricerche finalizzate ad analizzare la

migliore strategia di gestione energetica per una vettura ibrida elettrica. Questo si traduce nel modo di eseguire la gestione della coppia tra motore endotermico e macchina elettrica sulla electronic control unit (ECU).

L'attività progettuale si inserisce in questo contesto. L'obiettivo di questo lavoro è stato di studiare e simulare una strategia di controllo della coppia in una vettura ibrida elettrica al fine di minimizzarne i consumi.

Gli strumenti utilizzati per questa analisi sono il software di calcolo computazionale MATLAB[®] e per la parte riguardante la modellazione del veicolo il software Simulink[™].

Capitolo 2

Definizione di un HEV

In questo capitolo è fornita una definizione generale di veicolo ibrido elettrico e se ne elencano alcuni dei vantaggi.

2.1 Vantaggi di un HEV

L'aggiunta del propulsore elettrico ad una tradizionale architettura con motore a combustione interna permette di inserire un grado di libertà aggiuntivo. Sono molteplici i possibili utilizzi dell'inserimento di un motore elettrico oltre al termico. Di seguito ne sono riportati alcuni:

- Rigenerazione dell'energia cinetica in frenata
- Spegnimento del MCI nelle fasi di bassa velocità, per farne l'accensione solo nei punti di velocità e coppia maggiore, dove il suo rendimento è maggiore, come mostrato in Figura 4
- Riserva ausiliaria di coppia in ottica di *downsizing*: la riduzione della cilindrata del termico permette di farlo lavorare in zone di efficienza maggiori
- *Start/stop* efficace, quindi eliminazione dei consumi del motore al regime minimo
- Riduzione delle emissioni di CO₂, conseguenza della riduzione dei consumi

- Riempimento dei buchi di coppia nei cambi di marcia (*gap filling*)
- Possibilità di elaborare strategie per la gestione della coppia tra i due propulsori in ottica riduzione dei consumi
- Fonte aggiuntiva di potenza elettrica utile per alimentare la PE di bordo (accessori, A/C, ecc.)
- Incremento della dinamicità complessiva del veicolo, infatti la macchina elettrica si caratterizza per un'erogazione di coppia massima a velocità nulla, come mostrato in Figura 5
- Incremento dell'efficienza complessiva del propulsore ibrido: la macchina elettrica si caratterizza per rendimenti più elevati di quelli di un motore a combustione interna

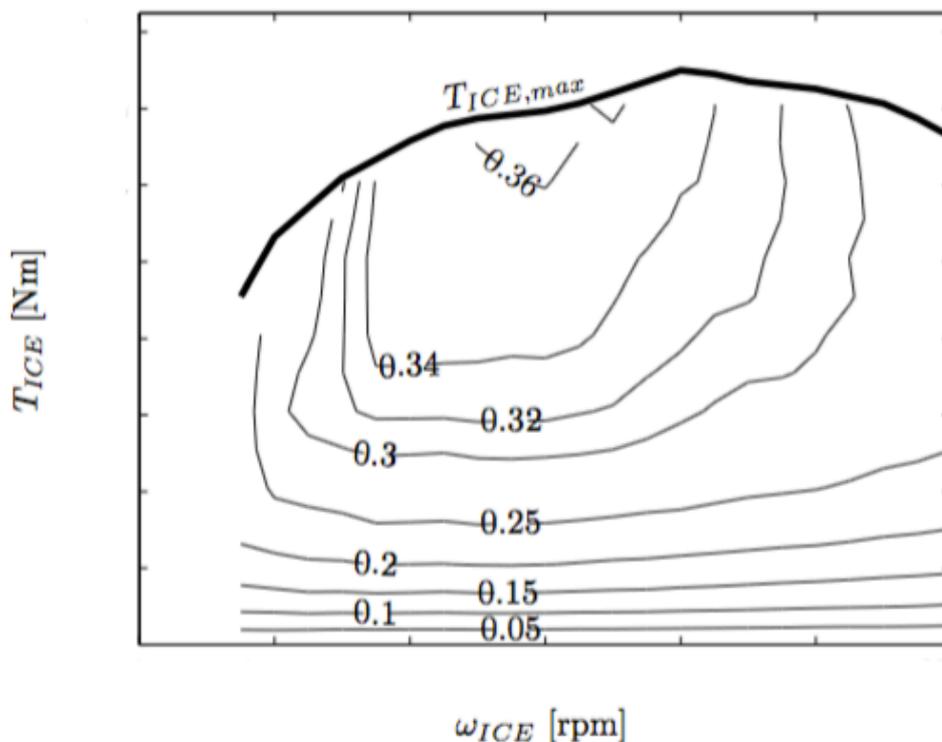


Figura 4 – Mappa di iso efficienza di un MCI

La curva di coppia del MCI segue il caratteristico andamento a ombrello mostrato in Figura 3. Il MCI raggiunge le zone di

efficienza maggiori in corrispondenza di richieste di coppia elevata. In quest'ottica, nelle condizioni di basso carico, è possibile anche erogare più coppia di quella richiesta per utilizzare quella in eccesso per ricaricare la batteria. La caratteristica di coppia della macchina elettrica, invece, è molto differente da quella dell'MCI: l'EMG eroga (o assorbe) una coppia maggiore a basse velocità. Questa caratteristica consente di aggiungere dinamicità al veicolo in quanto si migliora la risposta del propulsore alla richiesta del pilota.

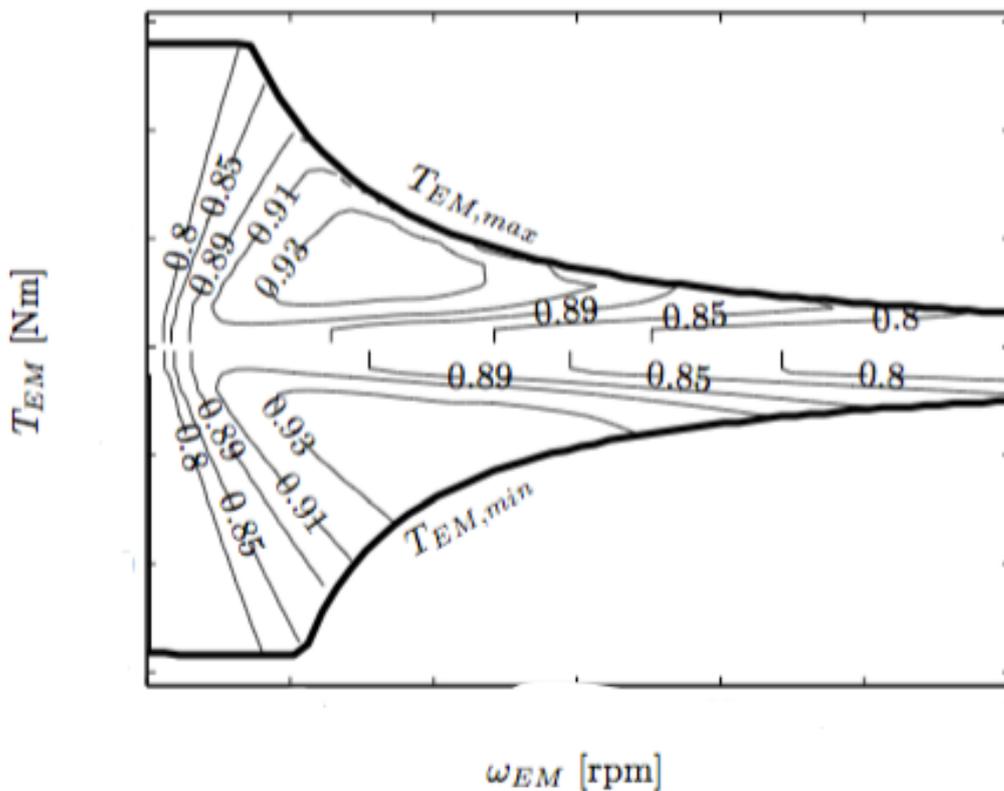


Figura 5 - Mappa di iso efficienza di un EMG

2.1.1 Grado di ibridizzazione

Al fine di paragonare diverse soluzioni per quanto riguarda l'ibridizzazione di un MCI è utile avere un indicatore che ne misuri il grado di ibridizzazione. Questo è costruito sulla base della massima potenza erogata dal motore elettrico e della potenza massima erogata dal motore termico:

$$GI = \frac{P_{EMG,max}}{P_{EMG,max} + P_{ICE,max}} \quad (2.1)$$

Di seguito una breve distinzione delle principali soluzioni ad oggi impiegate:

- Micro Hybrid: $GI \cong 5\%$
- Mild Hybrid (MHEV): $GI \cong 20\%$
- Full Hybrid (FHEV): $GI = 30\% \div 50\%$
- Plug-in Hybrid (PHEV): $GI > 50\%$
- Extended Range Electric Vehicle (EREV) $GI > 50\%$

Il *Micro Hybrid* è composto dall'affiancamento di una macchina elettrica di piccole dimensioni al MCI. In questa configurazione si fa riferimento ad un BSG (Belt Starter Generator). Questa soluzione è quella più economica in quanto essendo il BSG una macchina elettrica di piccole dimensioni ha costi minori di integrazione ed è alimentata con una batteria da 12V o 48V. La limitazione di questa soluzione è che la coppia erogata dal propulsore elettrico è limitata dallo slittamento della cinghia e dalla corrente massima, considerando la bassa tensione, pertanto la coppia massima erogabile è di $\approx 50 \div 60 Nm$ a seconda delle soluzioni.

Il *MHEV* è formato da un MCI più una macchina elettrica di medie dimensioni, alimentata da una batteria che può essere di 48V fino a 200-400V.

Il *FHEV* è dotato di una macchina elettrica con batteria ad alto voltaggio: 400 ÷ 600V. Questa dotazione permette di avere un'autonomia in modalità elettrica decisamente maggiore rispetto al micro HEV e al mild HEV.

Il *PHEV* è formato da un EMG con batteria ad alto voltaggio e la possibilità di collegarsi alla rete elettrica per la ricarica. Questa caratteristica è fondamentale per eseguire strategie di *charge depleting*, ovvero eseguire ampi tratti in pura erogazione elettrica, considerando che si farà la ricarica una volta giunti a destinazione. Negli altri casi, invece, solo una strategia di *charge sustaining* è possibile al fine di preservare il SOC della batteria.

L'architettura di un EREV è quella di un PHEV in serie, pertanto si ha sempre trazione elettrica ed è la soluzione più vicina ad un EV.

Tabella 1 - Comparativa di architetture ibride

Funzione/ Sistema	MICRO HEV	MHEV	FHEV	PHEV
Start/stop	✓	✓	✓	✓
EB/GF		✓	✓	✓
Frenata rigenerativa	minima	✓	✓	✓
EM		minima	✓	✓
Ricarica durante la guida	✓	✓	✓	✓
Ricarica dalla rete				✓

2.2 Topologia di un HEV

- Serie
- Parallelo
- Misto

2.2.1 Ibrido in serie

In questa configurazione la coppia richiesta alle ruote è erogata puramente dalla macchina elettrica, laddove invece il MCI ha la funzione esclusiva di fungere come generatore di energia elettrica che viene immagazzinata nella batteria. Il vantaggio di questa soluzione è evidente nell'uso cittadino, dove i motori endotermici tradizionali non esprimono elevate efficienze a causa delle basse coppie richieste.

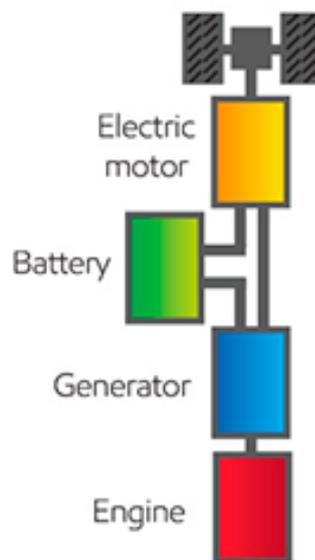


Figura 6 - HEV in serie

2.2.2 Ibrido in parallelo

In questa configurazione è possibile separare l'erogazione della coppia tra propulsore elettrico o termico o entrambi purché la somma delle due coincida con la richiesta di coppia del pilota. Questa caratteristica permette di eseguire il downsizing di entrambi i propulsori. Il vantaggio di questa soluzione rispetto a quella in serie è di sfruttare i propulsori nei loro punti di massima efficienza. Per esempio, in caso di richiesta di coppia a basse velocità (<4000 rpm) ha senso adoperare una trazione in elettrico, mentre in casi dove la coppia richiesta sia alta e la velocità sia discretamente alta (>2000 rpm) è più adeguata una trazione in termico.

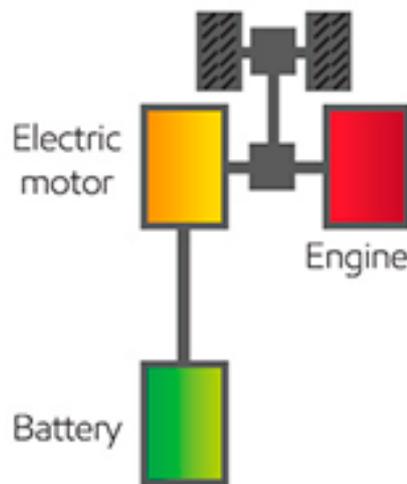


Figura 7 - HEV in parallelo

2.2.3 Misto

Questa architettura permette di disaccoppiare entrambi i propulsori sulla trasmissione mediante l'uso di frizioni. È pertanto possibile eseguire una guida in puro elettrico o in puro termico. Questa soluzione è quella che permette di sfruttare maggiormente i vantaggi dei propulsori. Gli svantaggi rispetto all'ibrido parallelo,

oltre ad un'ovvia complicazione del sistema, sono l'aggiunta di un generatore e di una batteria di dimensioni maggiori, il che porta ad un innalzamento dei costi.

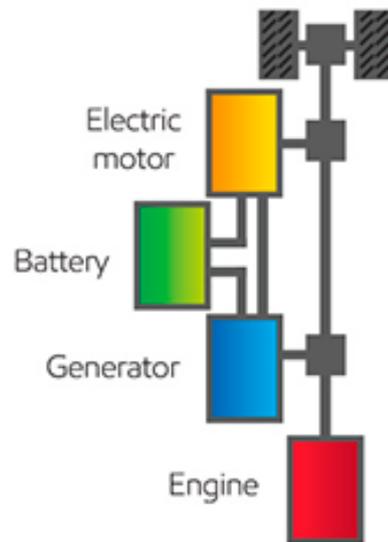


Figura 8 - Topologia HEV serie/parallelo

2.3 Architetture ibride

La possibile configurazione di una vettura ibrida elettrica in parallelo si suddivide in quattro diverse soluzioni: P1, P2, P3, P4. Ogni nomenclatura indica lo specifico posizionamento del motore elettrico all'interno della catena di trasmissione:

- P1: accoppiamento sull'albero motore del MCI. Solitamente la macchina elettrica è di piccole dimensioni e l'accoppiamento è fatto mediante cinghia (BSG)
- P2: accoppiamento sull'albero primario del cambio. Questa soluzione offre la possibilità di eseguire il distacco della

macchina elettrica rispetto al MCI. Ciò consente di eseguire una rigenerazione più efficiente in fase di frenata.

- P3: accoppiamento sull'albero primario del differenziale. Questa soluzione permette di recuperare più energia durante le fasi rigenerative in quanto l'accoppiamento avviene a valle del cambio.
- P4: accoppiamento sull'albero secondario del differenziale. Anche in questo caso, come per il P3, il potenziale di recupero energetico è maggiore rispetto alle soluzioni P1 e P2.

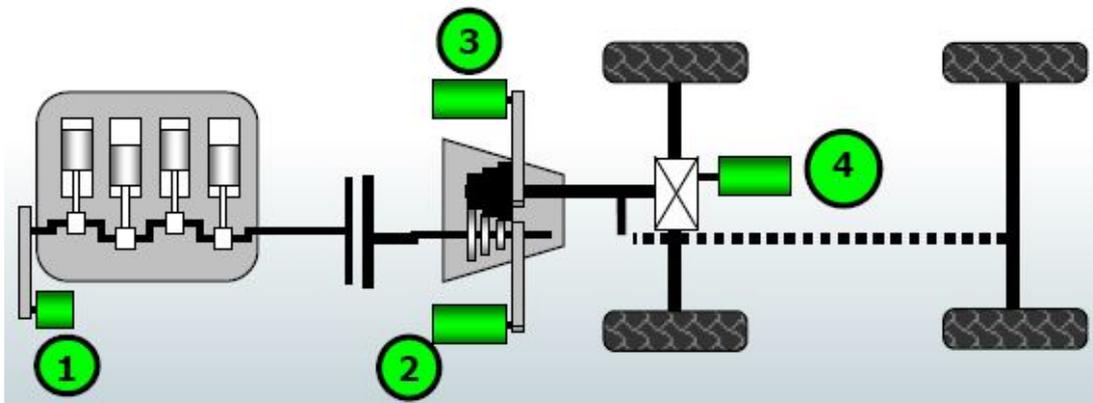


Figura 9 - Architetture per un parallel HEV

In questa trattazione la nomenclatura P1 si riferisce alla configurazione nota maggiormente in letteratura come P0.

Nel caso in cui l'EMG sia montato sullo stesso albero del MCI e questo non sia disaccoppiabile, teoricamente è comunque possibile ottenere un'erogazione al 100% elettrica ma l'EMG dovrebbe trascinare l'MCI, fatto che sicuramente non è conveniente dal punto di vista dell'efficienza e dei consumi equivalenti di combustibile. In questo caso si parla di *mild parallel hybrid electric vehicle*.

2.3.1 Fattore di split

Il fattore di split definisce il modo in cui è ripartita l'erogazione della coppia tra i due propulsori, ed è definito come segue:

$$u(t) = \frac{T_{EMG}(t)}{T_{EMG}(t) + T_{ICE}(t)} \quad (2.1a)$$

$$t. c. \quad u(t) \in [-n, 1] \quad (2.1b)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u(t) = 1 \\ 0 < u(t) < 1 \\ u(t) = 0 \\ -n < u(t) < 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (2.1c) \\ (2.1d) \\ (2.1e) \\ (2.1f) \end{array}$$

Dove

(2.1c) solo EMG

(2.1d) EB/GF

(2.1e) solo MCI

(2.1f) ricarica della batteria, n dipende dalle condizioni di coppia richiesta, e dalle caratteristiche di EMG, batteria e MCI

2.4 Definizione del modello veicolo

La tipologia di modello può essere *backward* o *forward*. La prima consente di eseguire delle simulazioni quasi statiche (QSS). Questo significa che la velocità, l'accelerazione e i carichi a cui è soggetto

il veicolo sono considerati costanti all'interno dell'intervallo temporale con cui è discretizzato il dominio temporale della simulazione. Nella simulazione 'all'indietro' l'input in ingresso al modello è la velocità del veicolo e tramite la conoscenza delle caratteristiche del veicolo (rapporti ed efficienze di trasmissione) si è in grado di calcolare la coppia da erogare alle ruote.

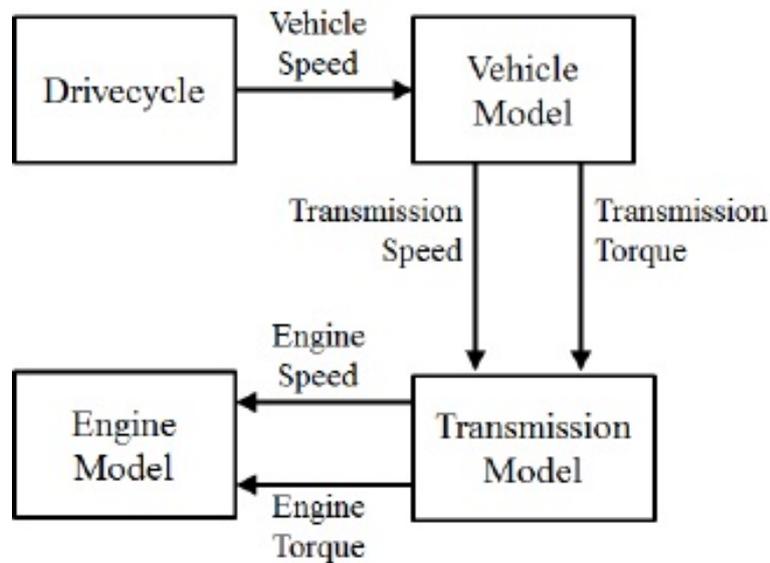


Figura 10 - Modello veicolo backward

Al contrario, il modello *forward* ha come ingresso la coppia erogata dal propulsore e calcola di conseguenza la corrispondente velocità o accelerazione in uscita.

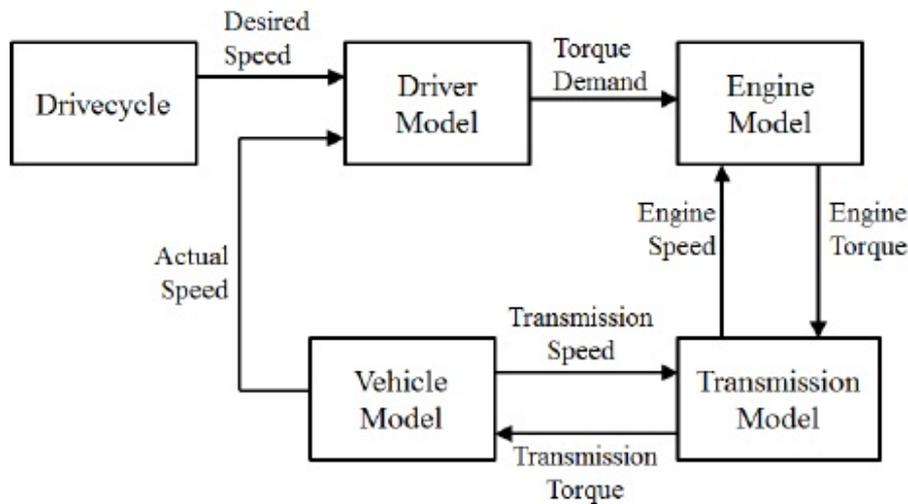


Figura 11 - Modello HEV forward

In sintesi, il modello ‘all’indietro’ è utilizzato nelle simulazioni riguardanti l’ottimizzazione dei consumi energetici di un veicolo, mentre il modello ‘all’avanti’ è utilizzato per analizzare il comportamento dinamico del veicolo e delle sue componenti.

2.4.1 Modello HEV

Al fine di ibridizzare un propulsore tradizionale è necessario sostituire la batteria tradizionale con una a medio/alto voltaggio, quindi 48 V per una soluzione mild HEV oppure una soluzione fino a 400-600V per i PHEV e i EREV.

È necessario aggiungere un controllore di potenza, ovvero un inverter e infine la macchina elettrica. Di seguito si esegue la modellazione delle varie componenti di un veicolo con un MCI, trasmissione manuale e macchina elettrica che cambia a seconda della configurazione. Sono analizzate le architetture P1 e P3.

2.4.2 Veicolo

Il modello delle ruote comprende le parti del veicolo che legano la velocità richiesta alla velocità angolare del differenziale, alla accelerazione del veicolo e alla coppia richiesta alle ruote. Bisogna pertanto tenere conto della massa del veicolo, della resistenza aerodinamica, della resistenza al rotolamento delle ruote e dei rapporti e rendimenti di trasmissione. In questa trattazione si considera una pendenza stradale nulla.

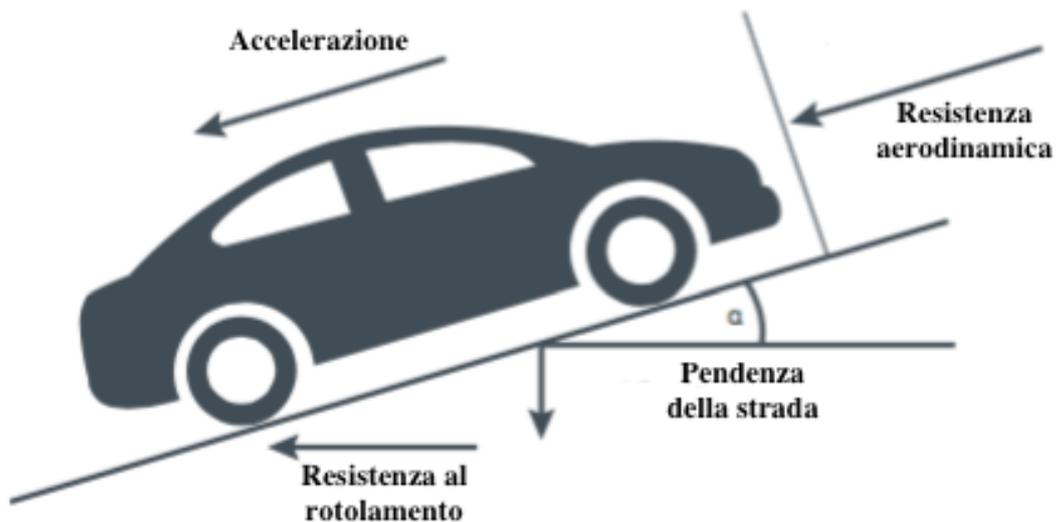


Figura 12 - Forze agenti sul veicolo

La forza che il veicolo deve vincere è stabilita come:

$$F_w = F_{res} + F_i \quad (2.2a)$$

Dove:

$$F_{res} = C_0 + C_1 v + C_2 v^2 \quad (2.2b)$$

$$F_i = m_v \frac{dv}{dt} \quad (2.2c)$$

C_0, C_1, C_2 sono i coefficienti relativi all'attrito di rotolamento e alla resistenza aerodinamica, m_v è la massa del veicolo e $\frac{dv}{dt}$ è l'accelerazione.

La velocità angolare delle ruote e la coppia trasmessa al differenziale sono espresse come:

$$\omega_w = \frac{v}{r_w} \quad (2.2.d)$$

$$T_w = F_w \cdot r_w \quad (2.2.e)$$

Dove r_w è il raggio delle ruote.

2.4.3 Differenziale

La coppia e la velocità angolare del differenziale sono modellate come:

$$\omega_{diff} = \omega_w \cdot \tau_{diff} \quad (2.3a)$$

$$\begin{cases} T_{diff} = \frac{T_w}{\tau_{diff} \eta_{diff}}, & se T_w \geq 0 \\ T_{diff} = \frac{T_w}{\tau_{diff}} \eta_{diff}, & se T_w < 0 \end{cases} \quad (2.3b)$$

$$(2.3c)$$

Dove:

τ_{diff} è il rapporto di trasmissione del differenziale

η_{diff} è l'efficienza di trasmissione del differenziale

In configurazione di P3 l'accoppiamento di EMG e MCI avviene sul differenziale. Allora, la coppia erogata dal MCI sul differenziale è calcolata come la differenza tra la coppia richiesta e quella erogata dalla macchina elettrica:

$$T_{diff,ICE} = T_{diff} - T_{diff,EMG} \quad (2.3d)$$

Dove

$$\begin{cases} T_{diff,EMG} = T_{EMG} \tau_{EMG} \eta_{tras,EMG} , & se \ T_{EMG} \geq 0 \quad (2.3e) \\ T_{diff,EMG} = \frac{T_{EMG} \tau_{EMG}}{\eta_{tras,EMG}} , & se \ T_{EMG} < 0 \quad (2.3f) \end{cases}$$

Dove

$T_{diff,EMG}$ È la componente erogata dalla macchina elettrica.

T_{EMG} è la coppia erogata dall'EMG.

2.4.4 Cambio

In questa trattazione si fa riferimento ad un cambio manuale. La marcia inserita è imposta secondo il ciclo di guida, non è quindi una variabile di ottimizzazione. L'efficienza del cambio dipende dalla marcia inserita.

$$\omega_{GB} = \omega_{diff} \cdot \tau_{GB}(k_g) \quad (2.4a)$$

$$\begin{cases} T_{GB} = \frac{T_{diff}}{\tau_{GB}(k_g) \cdot \eta_{GB}(k_g)}, & se T_w \geq 0 \\ T_{GB} = \frac{T_{diff}}{\tau_{GB}(k_g)} \cdot \eta_{GB}(k_g), & se T_w < 0 \end{cases} \quad (2.4b)$$

$$\begin{cases} T_{GB} = \frac{T_{diff}}{\tau_{GB}(k_g)} \cdot \eta_{GB}(k_g), & se T_w < 0 \end{cases} \quad (2.4c)$$

Dove

k_g è la costante che rappresenta la marcia inserita, t.c. $k_g \in [-1,0,1,2,3,4,5,6]$,

$\tau_{GB}(k_g)$ è il rapporto di trasmissione associato alla marcia inserita.

$\eta_{GB}(k_g)$ è l'efficienza di trasmissione associata alla marcia inserita.

2.4.5 Frizione

$$\omega_{clutch} = \omega_{GB} \cdot \tau_{clutch} \quad (2.5a)$$

$$\begin{cases} T_{clutch} = \frac{T_{GB}}{\tau_{clutch} \cdot \eta_{clutch}}, & se T_w \geq 0 \\ T_{clutch} = \frac{T_{GB}}{\tau_{clutch}} \cdot \eta_{clutch}, & se T_w < 0 \end{cases} \quad (2.5b)$$

$$\begin{cases} T_{clutch} = \frac{T_{GB}}{\tau_{clutch}} \cdot \eta_{clutch}, & se T_w < 0 \end{cases} \quad (2.5c)$$

Dove

τ_{clutch} è il rapporto di trasmissione della frizione;

η_{GB} è l'efficienza di trasmissione della frizione

2.4.6 MCI

Per il modello del MCI con HEV in configurazione P3 vale che:

$$\omega_{ICE} = \omega_{clutch} \quad (2.6a)$$

$$T_{ICE} = T_{clutch} + T_f \quad (2.6b)$$

Dove T_{ICE} è la coppia erogata dal motore, T_f è la coppia aggiuntiva per fare fronte alle frizioni del MCI, calcolate in funzione della velocità dello stesso.

Invece, in configurazione P1 la coppia del MCI è calcolata come:

$$T_{ICE} = T_{clutch} + T_f - T_{BSG} \quad (2.6c)$$

Dove T_{BSG} è la coppia erogata dal BSG.

In questo blocco è necessario calcolare la portata di combustibile consumata dal MCI per soddisfare la richiesta di coppia. Il consumo è calcolato mediante una mappa della portata massica di combustibile del motore preso in analisi, qualitativamente simile a quella normalizzata mostrata in Figura 14. Questa in ingresso riceve la velocità angolare e la coppia e restituisce il consumo in $[g/s]$.

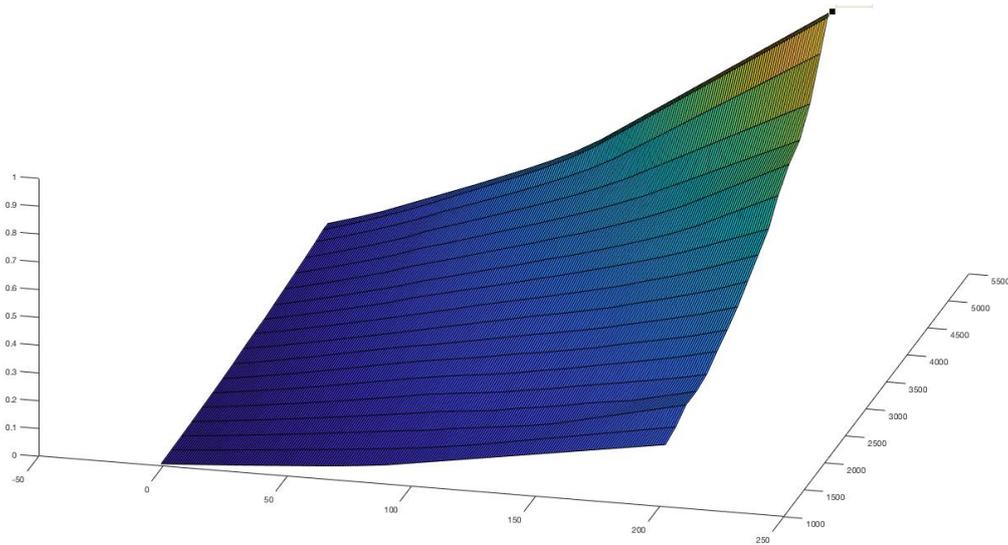


Figura 13 - Mappa del consumo specifico per il MCI

2.4.7 Macchina elettrica

In questo blocco si calcola la potenza elettrica necessaria ad attuare la coppia richiesta alla macchina elettrica.

La velocità della macchina elettrica vale

$$\omega_{EMG} = \omega_{diff} \cdot \tau_{el} \quad (2.7a)$$

Prima di tutto si calcola la coppia richiesta dalle ruote:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{EMG} = \frac{T_w}{\tau_{el,P3} \cdot \eta_{tras,P3}}, \quad se T_w \geq 0 \\ T_{EMG} = \frac{T_{GB}}{\tau_{el,P3}} \cdot \eta_{tras,P3}, \quad se T_w < 0 \end{array} \right. \quad (2.7b)$$

$$(2.7c)$$

Nel caso della configurazione P3 si ha che:

$$\eta_{tras,P3} = \eta_{diff} \eta_{tras,EMG} \quad (2.7d)$$

$$\tau_{el,P3} = \tau_{diff} \tau_{tras,EMG} \quad (2.7e)$$

La coppia in uscita deve essere limitata al fine di rispettare i limiti fisici della macchina elettrica. Innanzitutto occorre limitare la massima potenza erogabile

$$P_{EMG} = \omega_{EMG} T_{EMG} \quad (2.7f)$$

Tale che

$$\begin{cases} P_{EMG} \leq P_{EMG,max}, & se T_w \geq 0 \\ P_{EMG} \geq P_{EMG,min}, & se T_w < 0 \end{cases} \quad (2.7g)$$

Di seguito si impone il limite sulla massima coppia erogabile dalla macchina elettrica:

$$\begin{cases} T_{EMG} \leq T_{EMG,max}, & se T_w \geq 0 \\ T_{EMG} \geq T_{EMG,min}, & se T_w < 0 \end{cases} \quad (2.7h)$$

$$(2.7i)$$

Questo valore è moltiplicato per il fattore di split calcolato secondo la strategia implementata sulla ECU:

$$T'_{EMG} = T_{EMG} u \quad (2.7l)$$

La coppia elettrica così trovata deve poi essere espressa in forma di potenza elettrica da richiedere all'inverter, quindi:

$$P_{el,EMG} = T'_{EMG} \omega_{EMG} + P_{diss,EMG} \quad (2.7m)$$

Dove

$P_{diss,EMG}$ è la potenza dissipata dalle perdite dell'EMG e si calcola per interpolazione mediante una mappa ottenuta dalla caratterizzazione della macchina elettrica in questione. Questa

è mostrata in Figura 14. I valori sono normalizzati, sull'asse delle x si ha la coppia in [Nm], sull'asse delle y si ha la velocità in [rpm], sull'asse delle z si ha la potenza dissipata in [W].

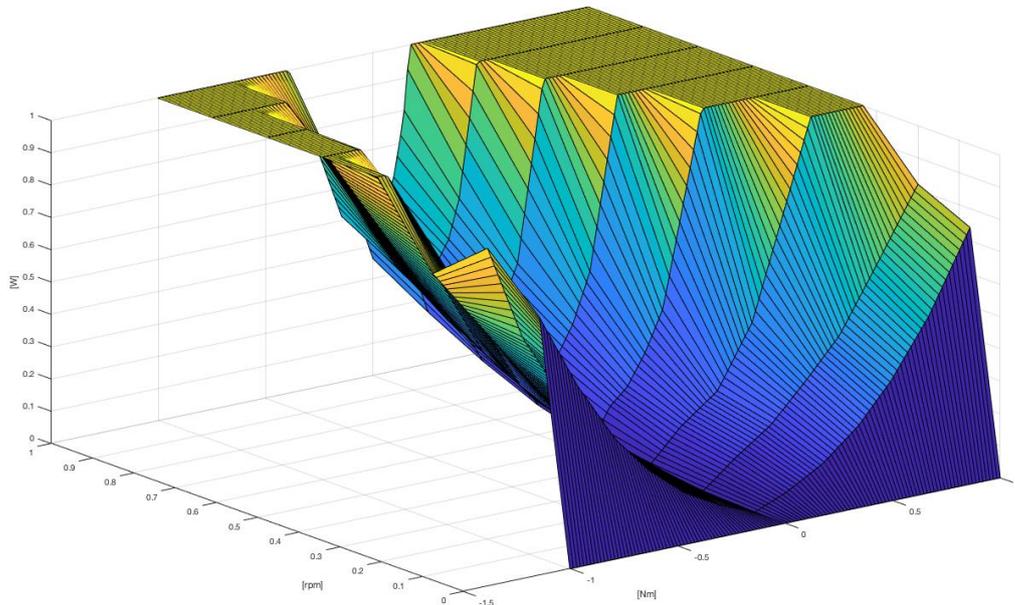


Figura 14 - Mappa di potenza dissipata per una macchina elettrica

2.4.8 Inverter

Lo scopo di questo blocco è calcolare la potenza elettrica erogata dalla batteria.

$$P_{inv,EMG} = P_{el,EMG} + R_{cables} I_{ph}^2 \quad (2.8)$$

Dove

I_{ph} è la corrente di fase ed è estrapolata da una mappa ottenuta dalla caratterizzazione della macchina elettrica in questione.

2.4.9 BSG

Questa macchina elettrica ha la peculiarità di essere collegata direttamente all'albero motore. Come modello il BSG è simile alla macchina elettrica, la differenza sta in questo caso nell'inverter che è integrato direttamente insieme al BSG, e che le potenze e le coppie erogabili da quest'ultimo siano inferiori rispetto a quelle dell'EMG.

$$\omega_{BSG} = \omega_{clutch} \cdot \tau_{BSG} \quad (2.9a)$$

$$\begin{cases} T_{BSG} = \frac{T_w}{\tau_{el,P1} \cdot \eta_{tras,P1}}, & se T_w \geq 0 \\ T_{BSG} = \frac{T_w}{\tau_{el,P1}} \cdot \eta_{tras,P1}, & se T_w < 0 \end{cases} \quad (2.9b)$$

Dove

$$\begin{aligned} \eta_{tras,P1} &= \eta_{diff} \eta_{GB} \eta_{clutch} \eta_{tras,BSG} \\ \tau_{el} &= R_{diff} R_{GB} R_{tras,BSG} \end{aligned} \quad (2.9c)$$

In questa configurazione deve essere sommata la coppia necessaria a vincere gli attriti del MCI, calcolata per interpolazione in una mappa che dipende da velocità e temperatura del MCI:

$$T'_{BSG} = T_{BSG} + T_{f,ICE} \quad (2.9d)$$

Infine, si limita la coppia in uscita per rispettare soddisfare i limiti fisici della macchina elettrica considerata. Il calcolo della coppia massima e minima erogabile dal BSG è fatto dinamicamente mediante una mappa in funzione dei giri:

$$T_{BSG,max} = interp(BSG_TRQ.RPM, BSG_TRQ.T, \omega_{BSG}) \quad (2.9e)$$

Quindi la coppia deve rispettare la seguente relazione

$$\begin{cases} T'_{BSG} \leq T_{BSG,max}, & \text{se } T_w \geq 0 \\ T'_{BSG} \geq T_{BSG,min}, & \text{se } T_w < 0 \end{cases} \quad (2.9f)$$

$$(2.9g)$$

Che nel modello Simulink si traduce come in Figura 15:

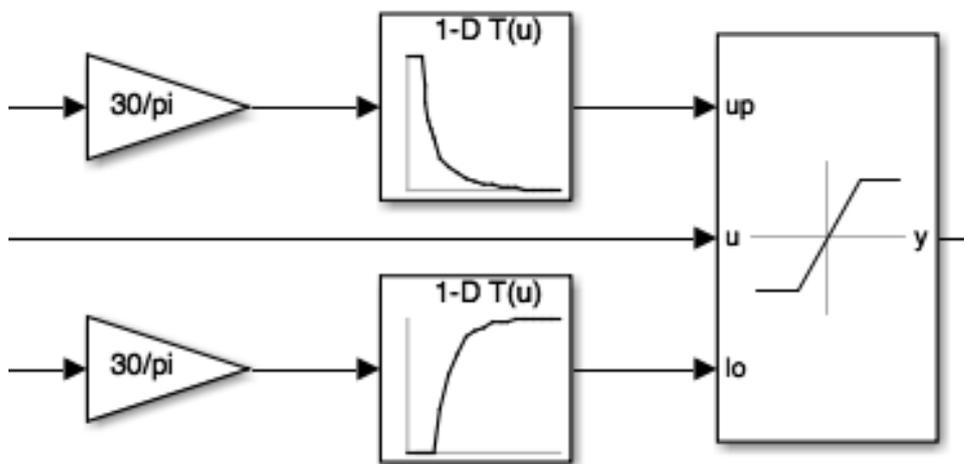


Figura 15 - Saturazione dinamica della coppia del BSG

È necessario calcolare la potenza meccanica corrispondente e la potenza dissipata, pertanto

$$P_{el,BSG} = T'_{BSG} \omega_{BSG} + P_{diss,BSG} \quad (2.9h)$$

Analogamente a Figura 14 la potenza dissipata è nota dalla caratterizzazione del BSG.

2.4.10 Batteria

La batteria è modellata secondo il circuito equivalente di Thévenin in Figura 16.

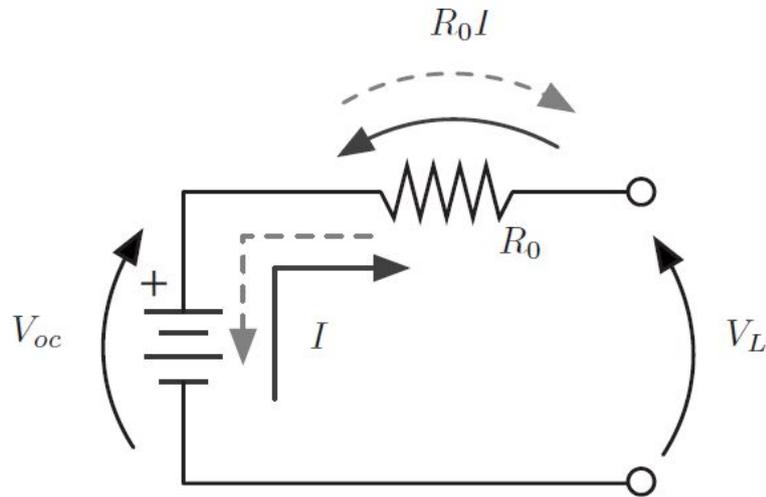


Figura 16 - Circuito della batteria

La potenza è calcolata come la potenza richiesta dall'inverter sommata alle perdite nei cavi:

$$P_{batt} = P_{inv} + R_{cavi} I_{batt}^2 \quad (2.10a)$$

Dove:

I_{batt} è la corrente di batteria, R_{cavi} è la resistenza dei cavi.

La corrente di batteria è calcolata come:

$$I_{batt} = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 R_{batt} P_{batt}}}{2 R_{batt}} \quad (2.10b)$$

Infine lo stato di carica della batteria è calcolato come:

$$SOC = -\frac{I_{batt}}{Q_{nom}} \cdot T_c + SOC_{k-1} \quad (2.10c)$$

Dove

T_c è l'intervallo temporale tra due iterazioni consecutive della simulazione

SOC_{k-1} è lo stato di carica all'iterazione precedente

Capitolo 3

Strategie per la gestione dell'energia in un HEV

In questo capitolo sono illustrate alcune delle strategie ad oggi impiegate nella ricerca della minimizzazione del consumo di energia di una vettura ibrida elettrica.

Innanzitutto, è necessario fare una prima distinzione fra strategie causali e non causali.

Una strategia non causale lavora sulla base della conoscenza dell'informazione totale del ciclo di guida a cui sarà sottoposto il veicolo e di conseguenza essa è in grado di trovare la soluzione ottima globale. Tuttavia, questo tipo di strategia è per definizione non implementabile a bordo del veicolo. L'utilità di un algoritmo non causale è che esso è usato come punto di riferimento per inquadrare i risultati raggiunti con una strategia causale.

Una strategia causale, invece, funziona sulla base di input che dipendono dalle condizioni di guida relative all'istante temporale considerato. Di conseguenza, non potrà mai raggiungere un grado di ottimo totale, piuttosto, se ben calibrata, si raggiunge un grado di sub ottimo che può avvicinarsi a quello di ottimo. Il vantaggio di una strategia di questo tipo è che essa ha la possibilità di funzionare su diversi profili di guida, con adattamenti minime.

Le strategie causali più diffuse sono senz'altro quelle euristiche. Ovvero, quelle strategie basate su delle regole imposte dal controllore a bordo della centralina. Il vantaggio della strategia euristica è che è facile da implementare ed ha una richiesta

computazionale molto bassa, che la rende ottima per un uso in tempo reale. Tuttavia, essa fornisce un risultato che può discostarsi di molto da quello ottimo, il che porta ad esplorare altre strategie causali. Una strategia causale che raggiunge un grado di sub-ottimo maggiore di quella euristica è la equivalent consumption minimization strategy (ECMS). Questa valuta la minimizzazione del consumo energetico equivalente dei due propulsori.

3.1 Dynamic Programming

In questa sezione per motivi di completezza si esegue una breve esplicazione riguardante una strategia di DP nonostante non sia stata studiata durante il progetto di tesi.

L'algoritmo di DP è basato sul "principio di ottimalità" introdotto da Bellman [7,8]. Questo algoritmo lavora *off-line*, dunque rientra nella categoria delle strategie non causali. Ciò implica la conoscenza preventiva del ciclo a cui verrà sottoposto il veicolo. Per tale ragione esso richiede un'elevata quantità di dati, che aumentano inevitabilmente il tempo di computazione. Il motivo per cui un algoritmo di questo tipo è utile nonostante non sia implementabile in un ciclo di guida reale è che permette di avere un termine di paragone valido con cui confrontare i risultati delle altre strategie.

Questo algoritmo discretizza temporalmente un problema in più sotto problemi di dimensioni inferiori. Il calcolo è eseguito a ritroso assumendo come variabile di stato il SOC. Partendo dal risultato finale si analizza ogni intervallo temporale corrispondente, ad un nodo del problema, data la conoscenza della velocità dalla conoscenza del ciclo guida, fino ad arrivare all'inizio della missione. Il risultato corrisponde alla mappa della variabile di split della coppia $u(t)$ che minimizza il problema. Per analizzare i punti

di guida diversi dai valori di breakpoint della mappa si interpola linearmente tra i due nodi adiacenti.

3.2 Formulazione di un problema di controllo ottimale

È necessario impostare correttamente il problema dal punto di vista matematico, ricordandosi che l'obiettivo è trovare un fattore di split della coppia che minimizzi i consumi di energia di un HEV.

A questa formulazione bisogna poi aggiungere i vincoli fisici dei propulsori, come la massima coppia erogabile rispettivamente dall'EMG e dal MCI, oltre che ai vincoli sui valori limite di SOC

La formulazione generale di un problema di controllo ottimale è la seguente:

$$\underbrace{\min}_{u(t)} J(u(t)) \quad (3.1a)$$

t.c.

$$\dot{x}(t) = F(t, x(t), u(t)) \quad (3.1b)$$

$$x(0) = x_0 \quad (3.1c)$$

$$x(t_f) \in [x_{f,min}, x_{f,max}] \quad (3.1d)$$

$$x(t) \in \chi(t) \quad (3.1e)$$

$$u(t) \in U(t) \quad (3.1f)$$

Dove la funzione di costo è espressa come:

$$J(t, u(t)) = \int_{t_0}^{t_f} H(t, x(t), u(t)) dt \quad (3.1g)$$

$x(t)$ rappresenta la variabile di stato del sistema, ovvero il SOC.

La formulazione generale di un problema di controllo ottimale per la minimizzazione del consumo di combustibile diventa quindi:

$$\underbrace{\min}_{u(t)} J(u(t)) \quad (3.2a)$$

t.c.

$$\dot{\xi}(t) = f(t, \xi(t), u(t)) \quad (3.2b)$$

$$\xi(0) = \xi_0 \quad (3.2c)$$

$$\xi(t_f) \in [\xi_{f,min}, \xi_{f,max}] \quad (3.2d)$$

$$\xi(t) \in [\xi_{min}, \xi_{max}] \quad (3.2e)$$

$$u(t) \in [u_{min}(t), u_{max}(t)] \quad (3.2f)$$

Dove:

$$J(t, \xi(t_0), u(t), \xi(t_f)) = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_f(t, u(t)) dt \quad (3.2g)$$

È la funzione di costo. Essa consiste nella minimizzazione dell'integrale della portata di combustibile su di un arco temporale, ovvero la massa totale di combustibile spesa durante un ciclo. $\dot{\xi}(t)$ è l'equazione di stato non lineare, definita come:

$$\dot{\xi}(t) = - \frac{I_{batt}(t, \xi(t), u(t))}{Q_{nom}} \quad (3.3)$$

Dove

I_{batt} è la corrente di batteria;

Q_{nom} è la capacità nominale della batteria;

3.3 ECMS

La ECMS è una strategia causale che minimizza i consumi energetici equivalenti di una vettura ibrida fornendo come valore di uscita lo split della coppia $u(t)$.

Il vantaggio di questa strategia è che essa a differenza degli algoritmi di DP è causale. Questa condizione permette quindi di poterne sviluppare un'implementazione in tempo reale sulla ECU con un basso carico computazionale. Inoltre, come dimostrato dagli autori di [12], la ECMS ottiene risultati che si avvicinano molto a quelli di un algoritmo di DP.

L'idea centrale di questa strategia è di rendere i consumi dei due propulsori di un HEV energeticamente equivalenti. Questa equivalenza energetica è in seguito minimizzata al fine di ridurre il consumo di energia complessiva.

Secondo questa teoria per ogni istante temporale esiste un valore della variabile di controllo $u(t)$ che minimizza l'Hamiltoniana del problema:

$$\forall t \in [t_0, t_f], \forall u(t) \neq u^*(t):$$

$$H(t, \xi(t), u(t), \lambda(t)) \geq H(t, \xi(t), u^*(t), \lambda(t)) \quad (3.4)$$

L'Hamiltoniana è definita come consumo equivalente di combustibile:

$$H(t, \xi(t), u(t), \lambda(t)) = H_l \dot{m}_f(t, u(t)) \dots + \lambda(t)f(t, \xi(t)) \quad (3.5)$$

Dove

$\lambda(t)$ è una variabile ausiliaria detta costato del sistema ed è definita come

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H}{\partial \xi} = -\lambda(t) \frac{\partial}{\partial \xi} f(t, \xi(t)) \quad (3.6)$$

Come dimostrato in [12] un problema di ottimizzazione deve tenere in considerazione i seguenti vincoli:

$$P_{pwt}(t) = P_{req}(t) \quad \forall t \in [t_0, t_f] \quad (3.7)$$

$$0 \leq P_{MCI}(t) \leq P_{MCI,max}(t) \quad \forall t \in [t_0, t_f] \quad (3.8)$$

$$P_{EMG,min}(t) \leq P_{EMG}(t) \leq P_{EMG,max}(t) \quad \forall t \in [t_0, t_f] \quad (3.9)$$

$$P_{batt,min}(t) \leq P_{batt}(t) \leq P_{batt,max}(t) \quad \forall t \in [t_0, t_f] \quad (3.10)$$

$$\xi_{min} \leq \xi(t) \leq \xi_{max} \quad \forall t \in [t_0, t_f] \quad (3.11)$$

$$\xi(t_0) = \xi_0, \quad \xi(t_f) = \xi_f \quad (3.12)$$

Dove P_{pwt} è la potenza erogata dalla catena cinematica, P_{req} è la potenza richiesta dall'utente, P_{MCI} è la potenza erogata dal motore a combustione interna, P_{EMG} è la potenza erogata dalla macchina elettrica. I pedici max, min fanno riferimento ai valori massimi e minimi di ciascuna grandezza.

L'equazione (3.7) significa che per ogni istante temporale la somma delle potenze erogate dal MCI e dal EMG deve coincidere con la potenza effettivamente richiesta dal pilota

Al fine di ottenere l'equivalenza tra l'energia associata al consumo di combustibile da parte del MCI e l'energia consumata dalla batteria è necessario portare entrambe su uno stesso piano. In

questa trattazione tale equivalenza è espressa in potenza è quindi possibile riscrivere l'Hamiltoniana come:

$$H(\cdot) = \dot{m}_f(\cdot)Q_{LHV} + \sigma(\cdot)P_{batt}(\cdot) \quad (3.13)$$

Dove

Q_{LHV} è il potere calorifico inferiore del combustibile impiegato.

\dot{m}_f il consumo specifico di combustibile.

σ è il fattore di equivalenza.

P_{batt} la potenza elettrica erogata dalla batteria.

3.3.1 Fattore di equivalenza

Il fattore di equivalenza rappresenta la catena di efficienze che portano dalla conversione della potenza elettrica dell'EMG alla conversione in massa di combustibile equivalente

$$\sigma(t, \xi(t)) = -\frac{\lambda(t)}{V_{OC}(\xi(t)) Q_{nom}}, \quad (3.14)$$

Esso permette di valutare l'energia spesa dalla batteria in un certo intervallo temporale come la quantità di combustibile necessaria a ricaricare la batteria dell'intervallo di carica corrispondente.

È opportuno calibrare il fattore di equivalenza in maniera tale che esso garantisca il rispetto dei limiti sul SOC. Ciò si ottiene introducendo all'interno di σ determinati vincoli, per esempio quelli relativi ai valori massimi e minimi di SOC. A tal fine il fattore di equivalenza diventa un fattore di penalizzazione. In questa trattazione si è studiata una curva costruita in modo che essa

favorisse l'utilizzo della macchina elettrica per valori di SOC molto al di sopra del valore di riferimento, e che al contrario limiti l'intervento della macchina elettrica in caso di SOC vicini al limite inferiore. Tale curva è definita da una funzione esponenziale:

$$\sigma = k \left(e^{q^{SOC_{ref}-SOC}} - OS \right) \quad (3.15)$$

Dove

k è una costante volta a sintonizzare l'entità della penalizzazione seconda delle caratteristiche della macchina elettrica.

OS è una costante di offset e al pari di k serve a calibrare σ .

q è un parametro di forma e serve a definire l'entità della curvatura della funzione.

SOC_{ref} è il valore di riferimento del SOC, in questo caso pari a 50%.

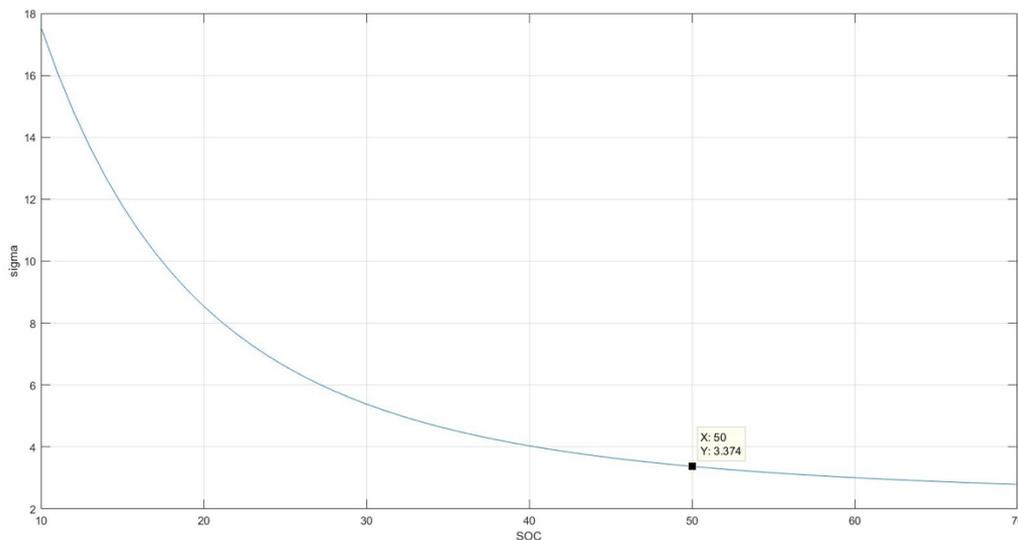


Figura 17 - Fattore di equivalenza

La scelta su di un fattore di equivalenza definito in questo modo è stata fatta dopo avere eseguito una comparativa con un fattore di

equivalenza definito da una retta. In questo caso la gestione del SOC si avvicina a quella fatta da una strategia euristica e il risparmio energetico finale è inferiore.

3.3.2 Simulazione off-line

Al fine di implementare la ECMS a bordo della ECU è necessario simulare per ogni intervallo temporale quali saranno i consumi equivalenti. Come mostrato in Figura 18 gli input in ingresso all’algoritmo di controllo sono quelli relativi a velocità del veicolo (quindi profilo di velocità del ciclo di guida che si sta simulando), SOC di riferimento e stima del SOC istantaneo. Dalla conoscenza della velocità e delle caratteristiche del veicolo è possibile risalire ad una stima di quelli che saranno i consumi energetici equivalenti in ogni iterazione.

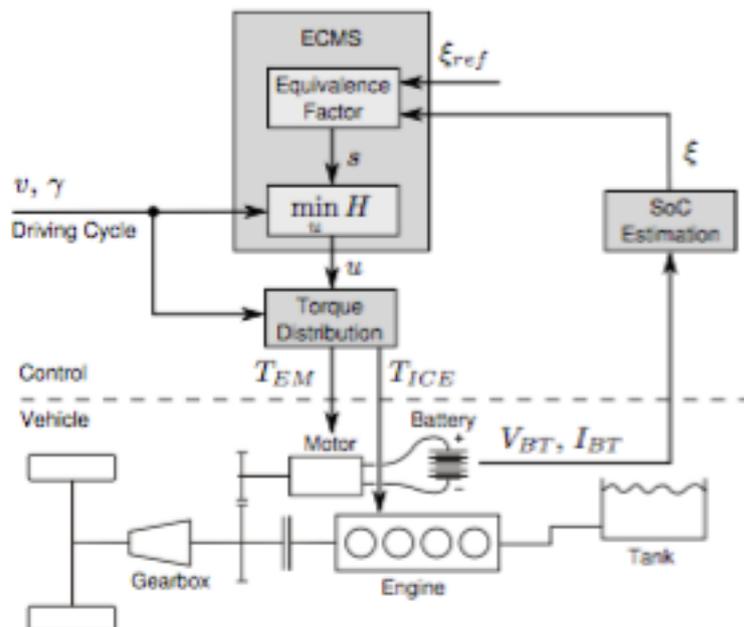


Figura 18 – Implementazione della strategia di ECMS

In questa trattazione la stima dei consumi equivalenti per un dato intervallo temporale è realizzata grazie alla costruzione di uno script che simula, all'interno del modello Simulink del veicolo i consumi energetici di MCI e macchina elettrica. È indispensabile che lo script, mostrato in Figura 19, fornisca gli stessi esatti output del modello Simulink affinché la stima sia plausibile. Pertanto, bisogna testare gli output in vari punti del modello affinché la corrispondenza sia verificata.

```

4
5  %% Load HEV data
23
24  %% Run HEV
34
35  %% Differential
45
46  %% Configuration: efficiencies and ratios
72
73  %% ECMS_STRATEGY
254
255  %% Gear Box
513
514  %% Clutch
573
574  %% BSG
806
807  %% Emissions
955
956  %% EMG
1013
1014  %% Inverter
1160
1161  %% Output
1162
1163
1164  sigma =k*(exp(q^(SOCref-SOC))+offset);
1165
1166  out =BSFC*LHV + Pbatt*sigma*1e-3 ;
1167
1168
1169  end

```

Figura 19 - Script che traduce il modello Simulink in Matlab

L'operazione di traduzione del modello Simulink in uno script è fondamentale al fine di potere elaborare una stima di quello che sarà il consumo energetico equivalente dell'HEV su una data iterazione. Infatti, essendo il modello di tipo backward, non è possibile conoscere il consumo energetico equivalente prima di definire la variabile di split.

La validazione dello script è mostrata nelle Figure 20 e 21:

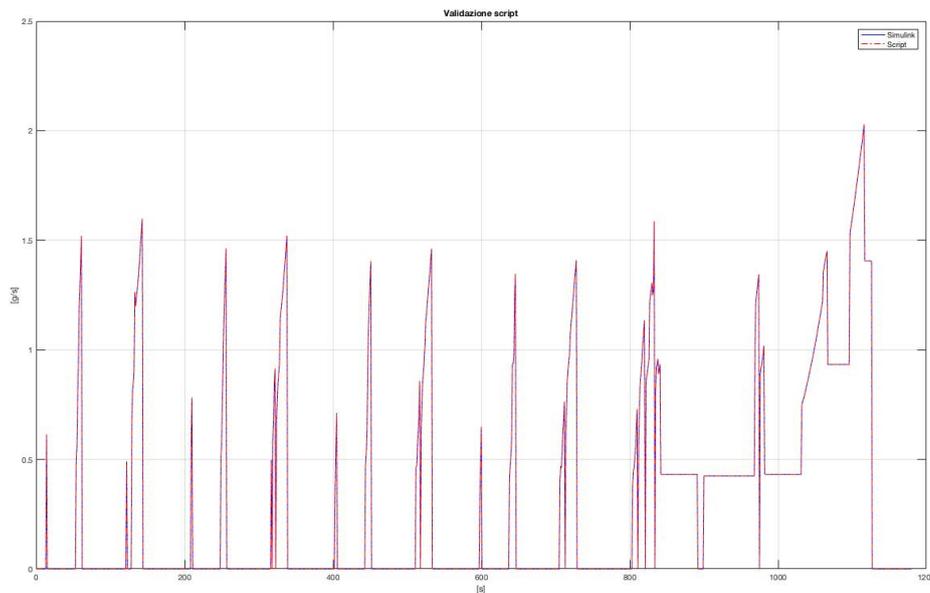


Figura 20 - Validazione script - BSFC

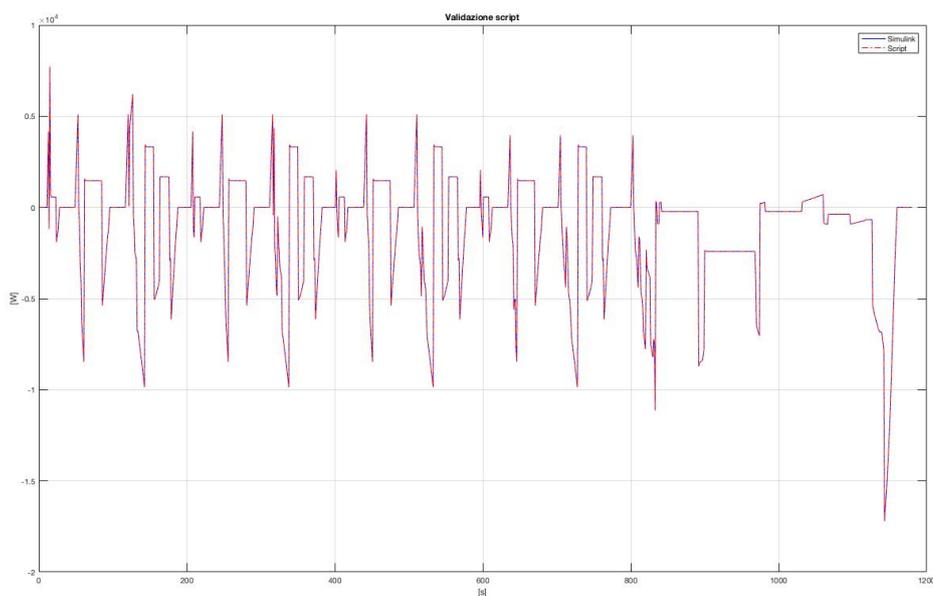


Figura 21 - Validazione script - Potenza elettrica della batteria

Lo script viene valutato ad ogni iterazione della simulazione in Simulink grazie ad una 2nd Level S-Function mostrata in Figura 22, che fornisce in uscita il valore della variabile di split.

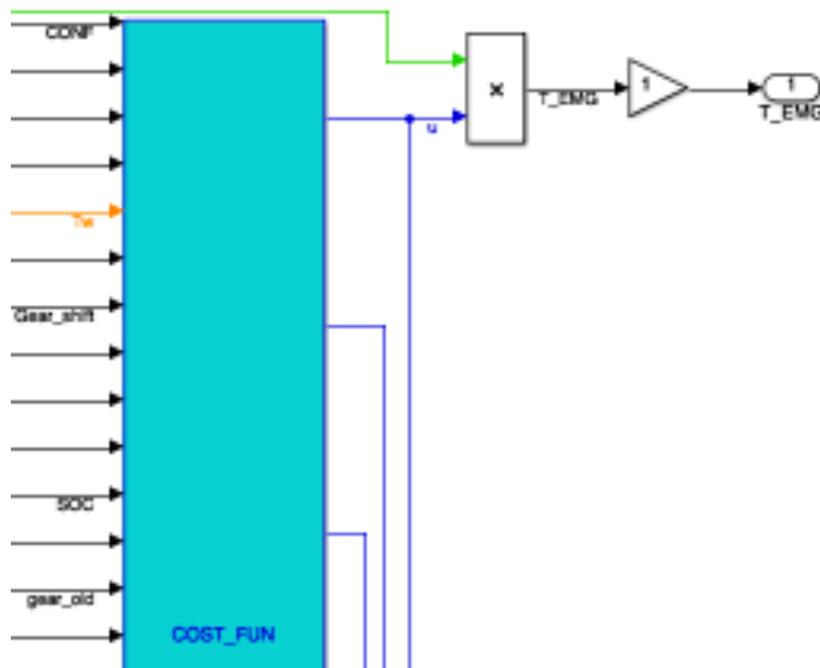


Figura 22 - 2nd Level S-Function

È conveniente, dal punto di vista del carico computazionale, definire un input allo script dei consumi in forma vettoriale, come mostrato in Figura 23 per potere valutare diversi fattori di split senza dovere ricorrere ad un ciclo for che aggreverebbe decisamente i tempi di simulazione.

```

417 -   SPLIT =-1:0.1:1;
418 -
419 -   [COST,Pbatt,BSFC]= script_PWT_HEV(SPLIT,CONF,CONF_TYPE,CYCLE,Ww,...
420 -     Tw,Acc,gear,Vdc_old,T_Gear_old,Wdiff_old,Gear_shift,T_ICE_F_P1,TCU_EFF_GEAR,...
421 -     TCU_RATIO_CLUTCH,Time,VEL_KM_H,P_Batt_old,SOC_old,H_sts,TH20_old,rel_old,...
422 -     LV_SOC_old,LV_IB,curr_GS);
423 -
424 -   split_index= find(COST==min(COST));
425 -
426 -   SPLIT= SPLIT(split_index);

```

Figura 23 - Inserimento del vettore di split

All'uscita si ottiene pertanto una funzione di costo in forma vettoriale. A quel punto si tratta di eseguire un semplice calcolo del minimo elemento di un vettore. L'elemento corrispondente individua lo split che verrà utilizzato all'interno del modello Simulink.

3.4 Strategia euristica

Questa strategia è quella che si presta maggiormente ad una implementazione nella ECU dato il suo basso carico computazionale e la semplicità di definizione delle regole. La strategia euristica con cui si esegue il confronto della ECMS è mostrata in Figura 24.

Una strategia per regole è costruita in maniera tale da soddisfare certi requisiti, questi sono volti principalmente a garantire uno stato di carica minimo, per cui in caso di raggiungimento del limite inferiore del SOC la coppia da erogare è affidata integralmente al MCI.

Altre indicazioni riguardano la rigenerazione energetica in fase di frenata: in caso di coppia alle ruote negativa si spegne il MCI per sfruttare al meglio la ricarica della batteria.

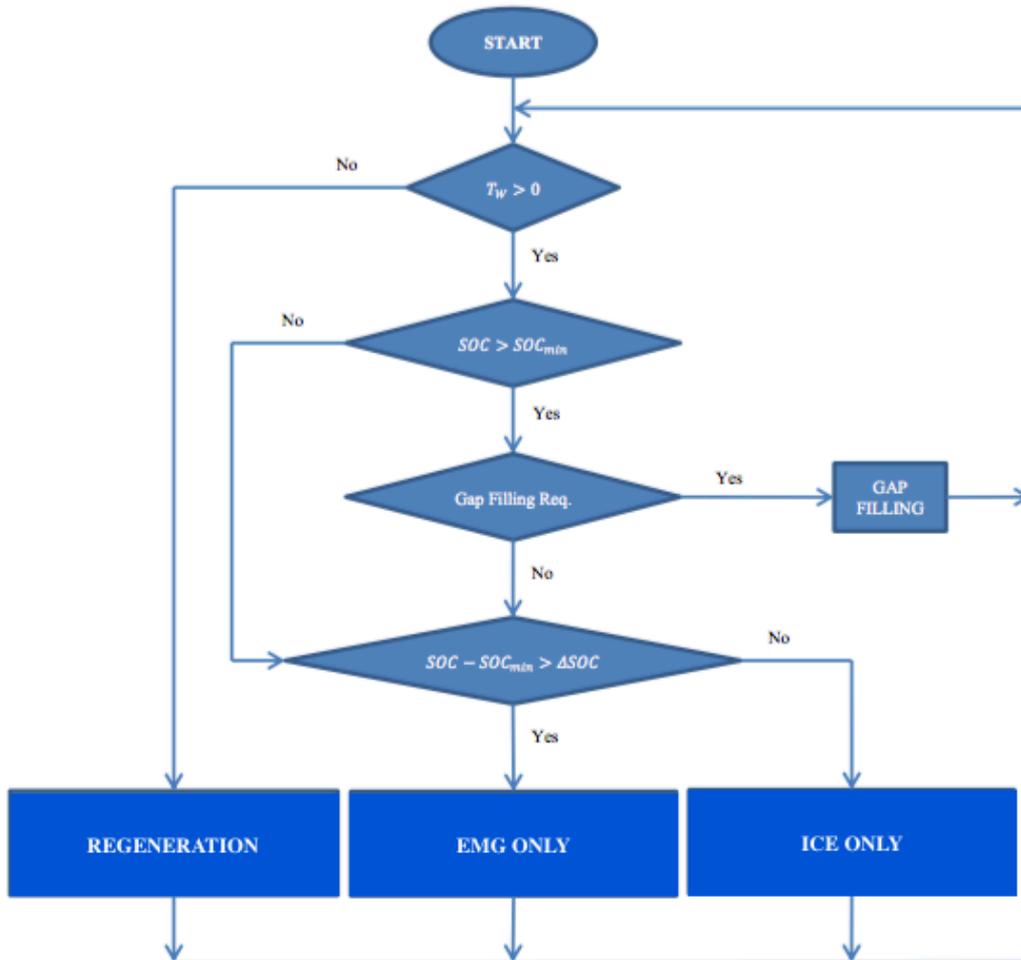


Figura 24 - Esempio di strategia euristica

Infine, la guida completamente elettrica è permessa solamente quando lo stato di carica si trova al di sopra di una soglia. Lo svantaggio in questo caso sta nell'usare la macchina elettrica sempre fino al raggiungimento della carica minima di batteria, il che potrebbe impedire l'utilizzo del EMG in fasi di guida successive dove per esempio un utilizzo della trazione elettrica sarebbe più vantaggioso rispetto a quello del MCI.

Capitolo 4

Risultati

In questo capitolo sono illustrati i risultati ottenuti dalle simulazioni della strategia ECMS in confronto alla strategia euristica mostrata in Figura 24. È stato analizzato il modello dell'HEV proposto nel Capitolo 2 in riferimento ai cicli di guida NEDC [18] e WLTP [19]. Il modello HEV è stato studiato in configurazione P3 e in configurazione P1. Su quest'ultimo l'implementazione della ECMS è qui solamente nella sua fase introduttoria, pertanto ulteriori analisi sono necessarie al fine di sfruttare appieno la potenzialità dell'ECMS in quest'ottica

Dal punto di vista dello stato di carica le strategie sono state calibrate in *charge sustaining*. In questo modo è possibile analizzare i risultati senza dovere convertire la differenza di carica in consumo equivalente di combustibile. I parametri di riferimento per la gestione energetica della batteria sono i seguenti:

$$SOC_{min} = 20\% \quad (4.1a)$$

$$SOC_{max} = 80\% \quad (4.1b)$$

$$SOC_{ref} = 50\% \quad (4.1c)$$

4.1 Ciclo NEDC

Questo ciclo consta di un ciclo urbano (ECE-15) con tre rampe di velocità a 15 km/h, 32 km/h e 50 km/h ripetuto quattro volte per un totale di 780 s e una distanza teorica di 3976,1 m, una velocità media di 18,35 km/h. Segue un tratto extra urbano (EUDC) con una rampa di velocità che giunge sino a 120 km/h, per una durata totale di 400 s e una distanza teorica di 6956 m e una velocità media di 62,6 km/h.

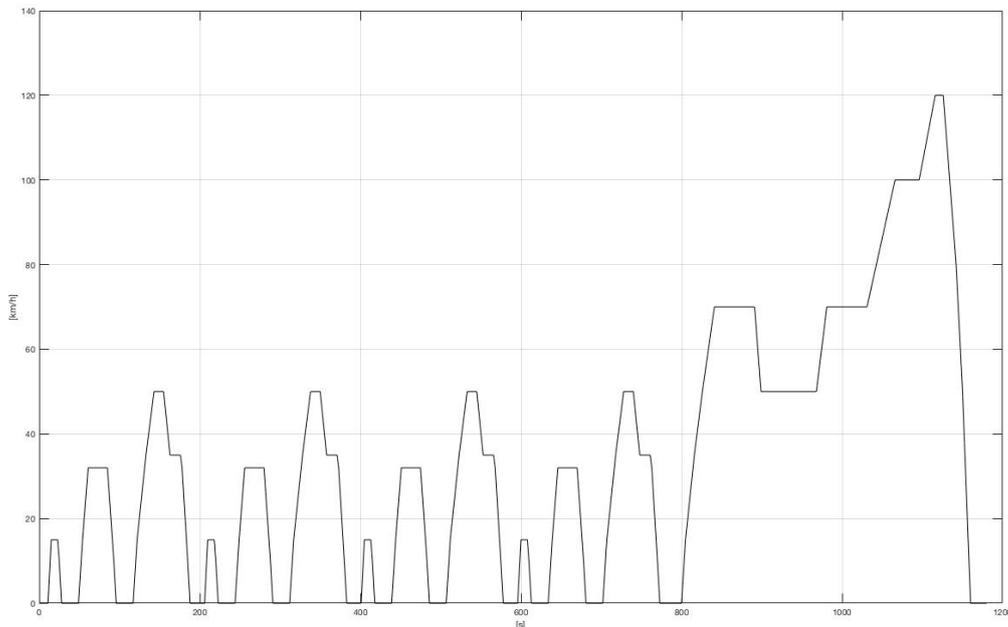


Figura 25 - NEDC

Il profilo di cambio marcia dipende dal ciclo di guida e pertanto non è una variabile di ottimizzazione. Per il NEDC l'inserimento delle marce è indicato in Figura 26:

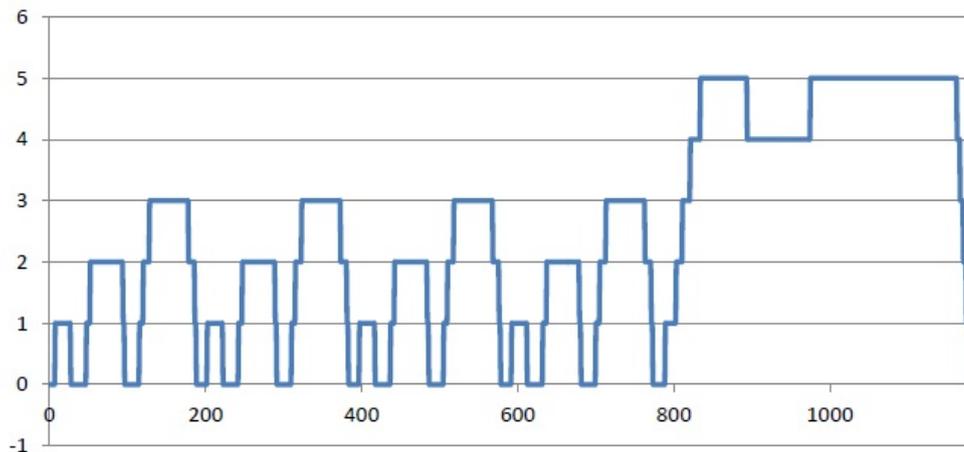


Figura 26 - Profilo di cambio marce per il ciclo di guida NEDC

4.1.1 Configurazione P3

In questa configurazione, con la macchina elettrica accoppiata sulla trasmissione a valle del cambio, è possibile eseguire una strategia di *gap filling* (GF), ovvero utilizzare l'EMG nei punti di cambio marcia al fine di riempire i buchi di coppia dovuti all'apertura della frizione e quindi al distacco del MCI dalla trasmissione. Pertanto, nei punti dove è richiesto GF la strategia di ECMS viene bypassata.

4.1.1.1 SOC

Innanzitutto, è opportuno analizzare la gestione energetica della batteria. In Figura 27 è mostrato il confronto in termini di SOC tra ECMS e strategia euristica. Al fine di soddisfare la strategia di *charge sustaining* entrambe le strategie eseguono una gestione del SOC intorno al riferimento pari al 50% della carica di batteria.

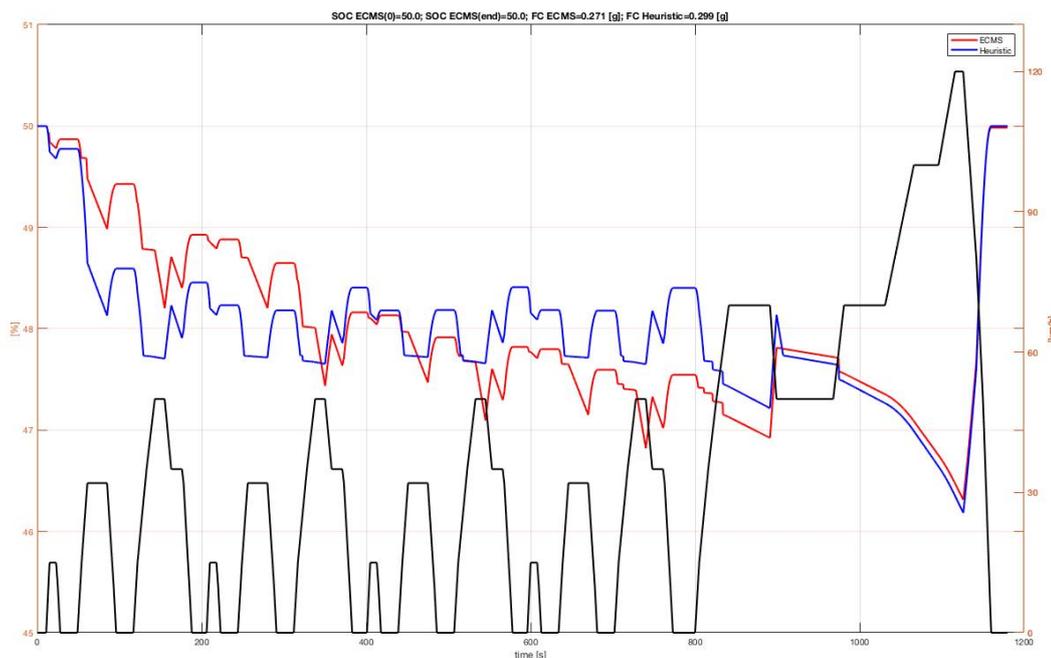


Figura 27 - SOC, NEDC, P3, ECMS vs euristica

La differenza iniziale tra le due strategie riguarda il primo dei quattro cicli urbani. Sin dall'inizio del ciclo la strategia euristica utilizza immediatamente l'EMG, quando la disponibilità di energia è alta. Segue un andamento che oscilla attorno ad un valore di soglia nel quale si alternano fasi di EB a fasi di ricarica. Infine, nel tratto extra urbano, si ha un abbassamento del SOC dovuto all'impiego del motore elettrico a fronte di una richiesta elevata di coppia. Viceversa, la strategia di ECMS esegue un utilizzo iniziale inferiore della macchina elettrica, per poi aumentarne l'entità nei seguenti tre cicli urbani. Questo andamento del SOC ottenuto dalla ECMS consente di risparmiare una parte dell'energia disponibile inizialmente al fine di eseguirne l'impiego in maniera più efficace nelle fasi successive del ciclo. Nell'ultima rampa ad alta velocità le due strategie sono praticamente combacianti. Ciò è dovuto all'elevata richiesta di coppia, la quale rende la libertà di gestione energetica decisamente limitata dalla necessità di erogare coppia tramite entrambi i propulsori.

Analizzando la rampa di velocità in corrispondenza di $t = 800$ s è possibile apprezzare la strategia di GF dal punto di vista della gestione energetica. Ogni gradino nell'andamento del SOC di Figura 28 è corrispondente ad un punto di cambio marcia, dove è erogata una coppia ausiliaria per fare fronte al buco di coppia che si genera dal momento in cui il MCI si disaccoppia dalla trasmissione.

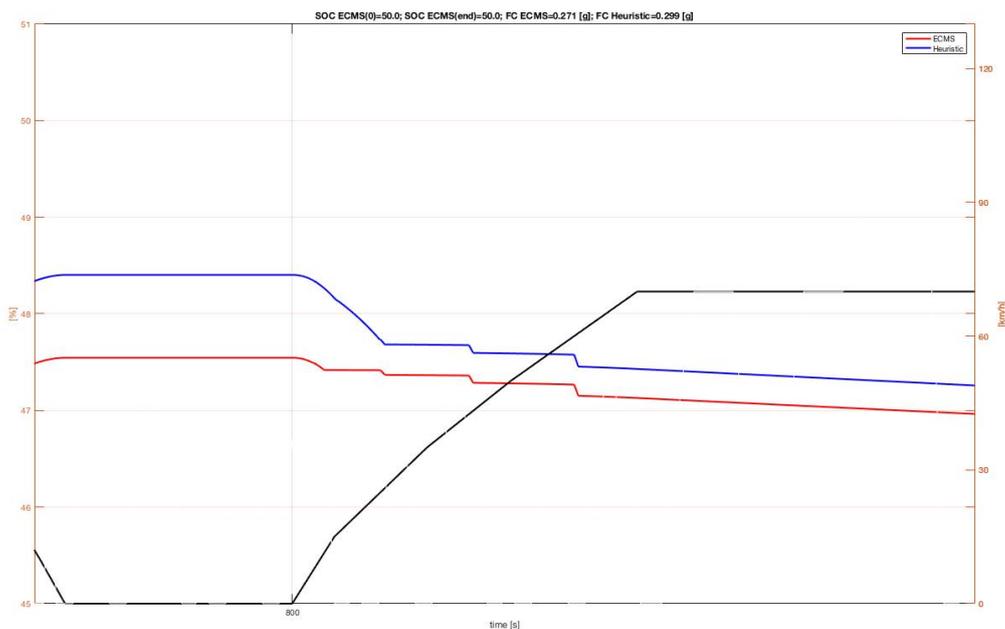


Figura 28 - Scarica di SOC dovuta al GF

È stimato che l'implementazione del GF durante il ciclo utilizzi lo 0,8% dell'energia della batteria, che si traduce in 2 grammi di carburante consumati, su un totale di 271 g per la ECMS, 299 g per la strategia euristica.

Il risultato ottenuto su questo ciclo da un algoritmo di DP è proposto in [9], come mostrato in Figura 29.

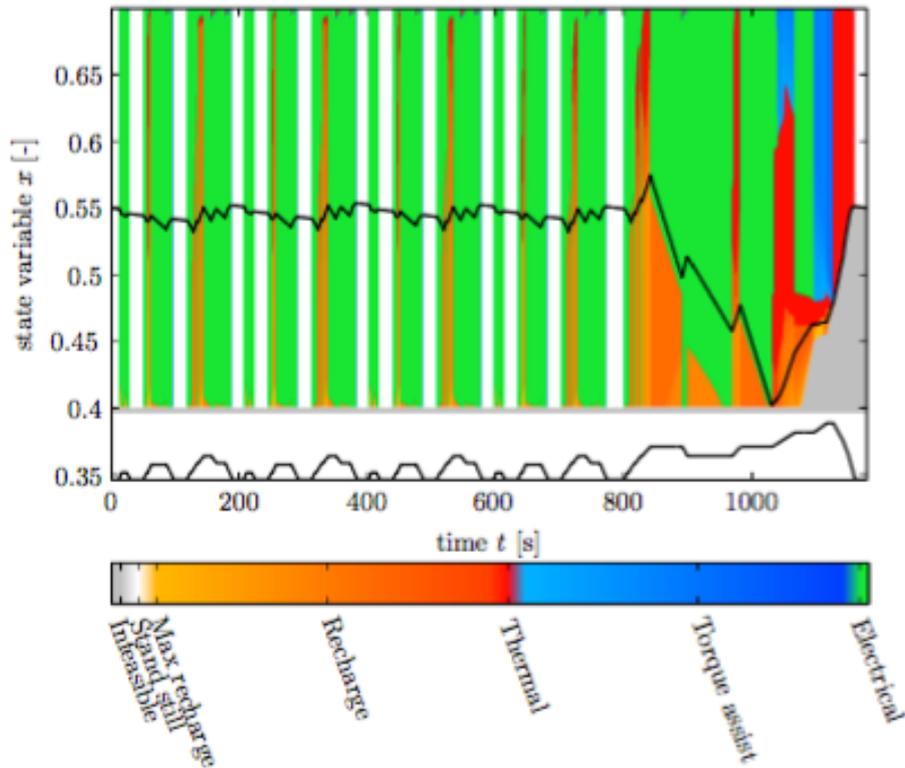


Figura 29 - Algoritmo di DP per la guida di un HEV sul NEDC

L'algoritmo di DP rimane circa costante nei quattro cicli urbani del NEDC, in vista della rampa di velocità nella parte extra urbana del ciclo. Questo risultato è da considerare solo qualitativamente, in quanto il modello della macchina elettrica impiegato con questo algoritmo consente di eseguire ricariche maggiori: il SOC cresce del 15 % nell'ultima decelerazione, mentre sul modello attuale è possibile recuperare solo il $\cong 4\%$. Per questo motivo non è possibile eseguire un paragone numerico dei consumi rispetto al modello studiato in questo elaborato.

4.1.1.2 Coppia all'EMG

Analizzando la coppia erogata dalla macchina elettrica, in Figura 30, si evince come la strategia ECMS prediliga l'utilizzo dell'EMG anche nelle zone in cui la velocità è costante:

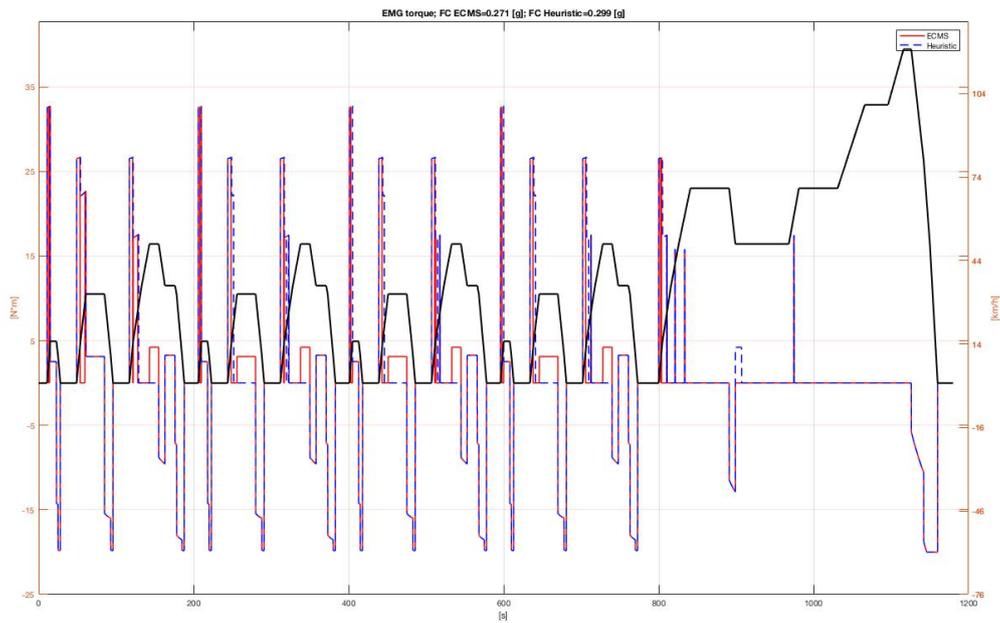


Figura 30 - EMG torque, NEDC, P3, ECMS vs euristica

Analizzando l'andamento su di un ciclo urbano si ha che:

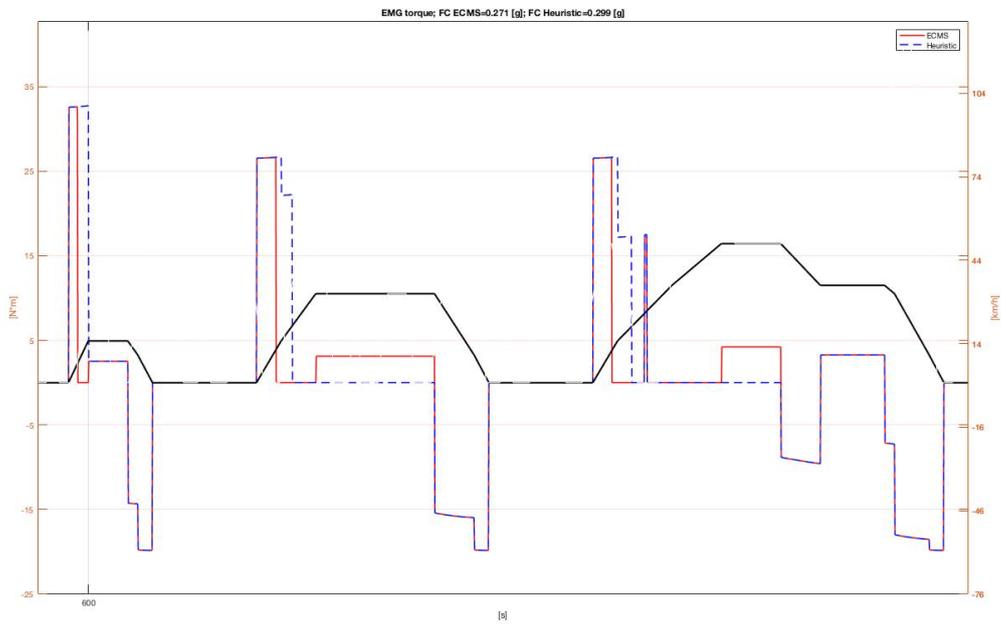


Figura 31 - Coppia EMG, NEDC, dettaglio

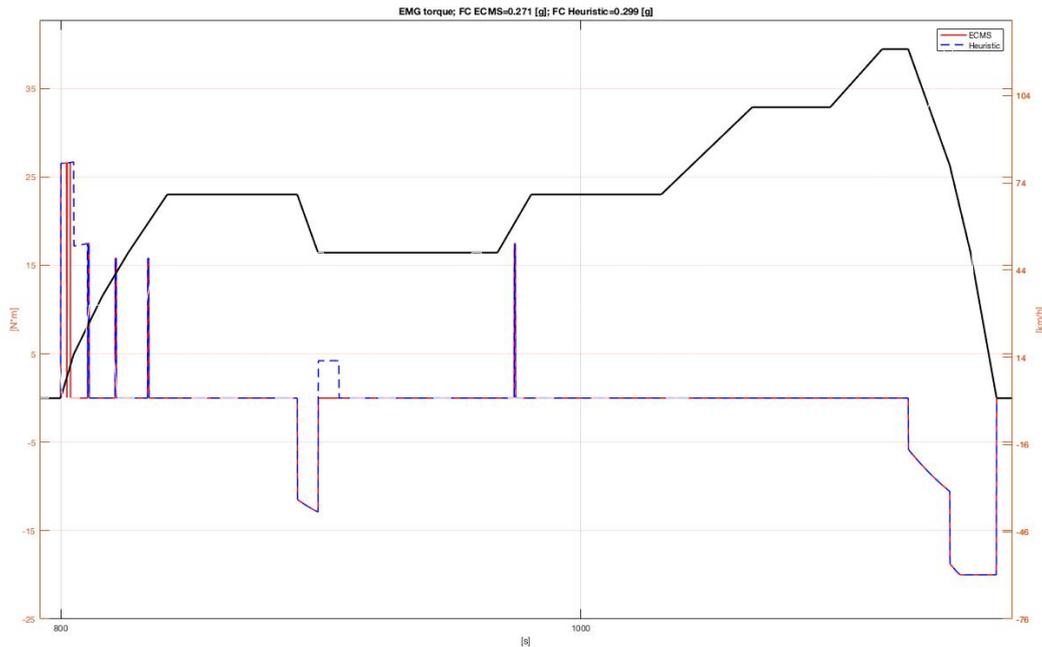


Figura 32 - Coppia EMG, NEDC, dettaglio ciclo extra urbano

Quindi, mentre nei tratti a bassa velocità (15 km/h) sia la strategia euristica che la ECMS eseguono una propulsione elettrica, nei tratti a velocità medio elevate (32 km/h e 50 km/h) solo l'ECMS utilizza l'erogazione elettrica. La strategia euristica utilizza la propulsione elettrica nei tratti a velocità medie solo dopo avere beneficiato di una fase rigenerativa. È in questi punti che la ECMS ottimizza maggiormente la ripartizione della coppia tra i due propulsori.

Per quanto riguarda il tratto di ciclo extra urbano, le due strategie seguono praticamente lo stesso andamento. Ciò è dovuto alle caratteristiche della macchina elettrica: per alte velocità aumentano le potenze dissipate e diminuisce la coppia erogabile. Pertanto, in questi casi, conviene maggiormente l'utilizzo del MCI che invece ha rendimenti elevati laddove la coppia erogata sia elevata.

4.1.1.3 Coppia del MCI

Dal grafico sulla coppia erogata dal MCI di Figura 33 si evince un andamento che rispecchia quanto visto per la coppia dell'EMG.

Nei punti di ripartenza da velocità nulla non è sempre conveniente utilizzare solo la macchina elettrica come accade per la strategia euristica ma si esegue con la ECMS un affiancamento delle due propulsioni al fine di soddisfare la richiesta del conducente.

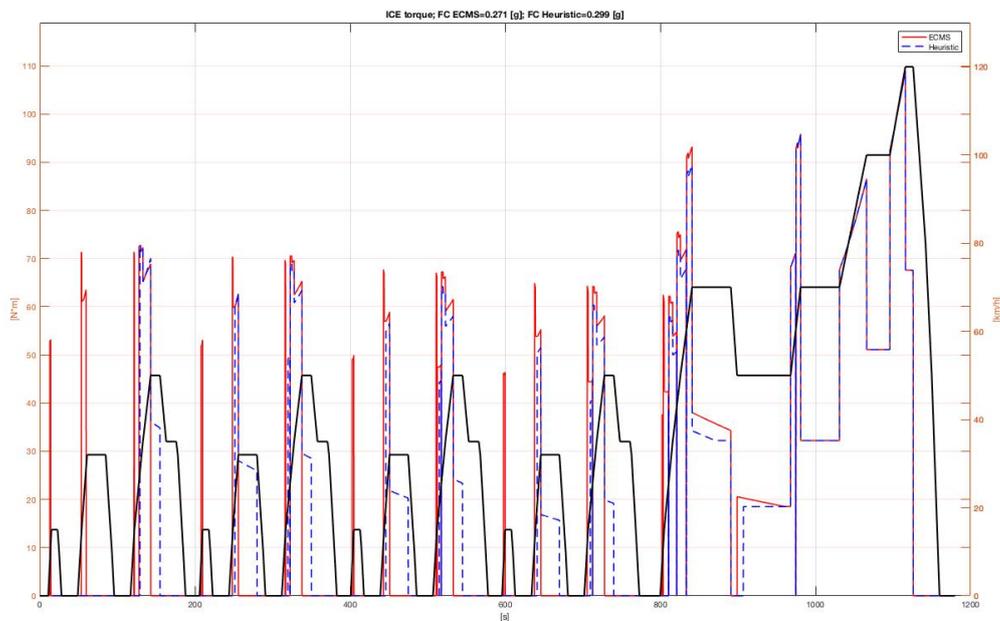


Figura 33 – Coppia del MCI, NEDC, P3, ECMS vs euristica

Il dettaglio mostrato in Figura 34 mostra nel dettaglio la coppia del MCI per ECMS ed euristica:

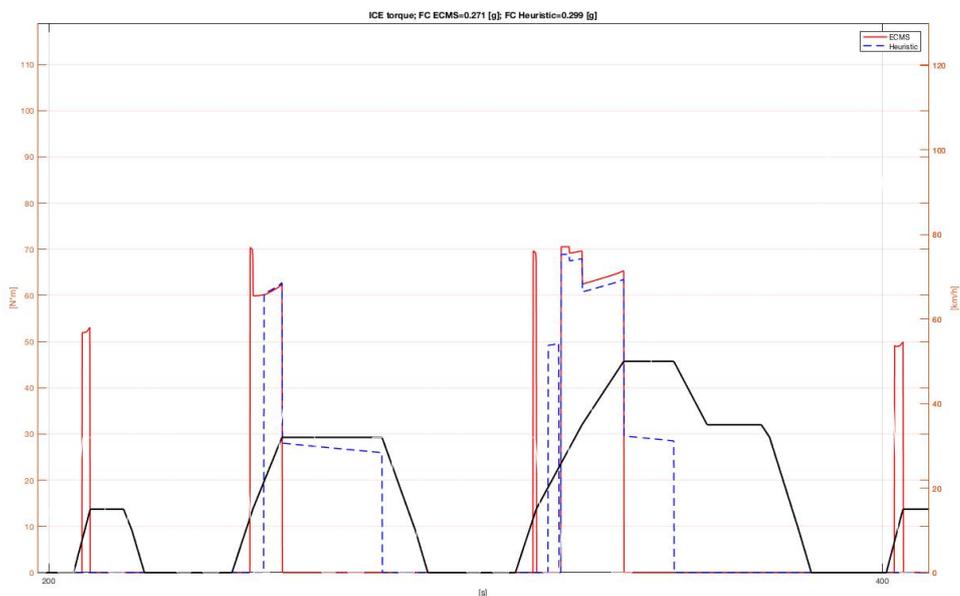


Figura 34 - Coppia del MCI, NEDC, dettaglio ciclo urbano

Infine, per entrambe le strategie, i punti a coppia maggiore vengono effettuati con propulsione a MCI. Questo risultato è in linea con le caratteristiche dei due propulsori, come visto.

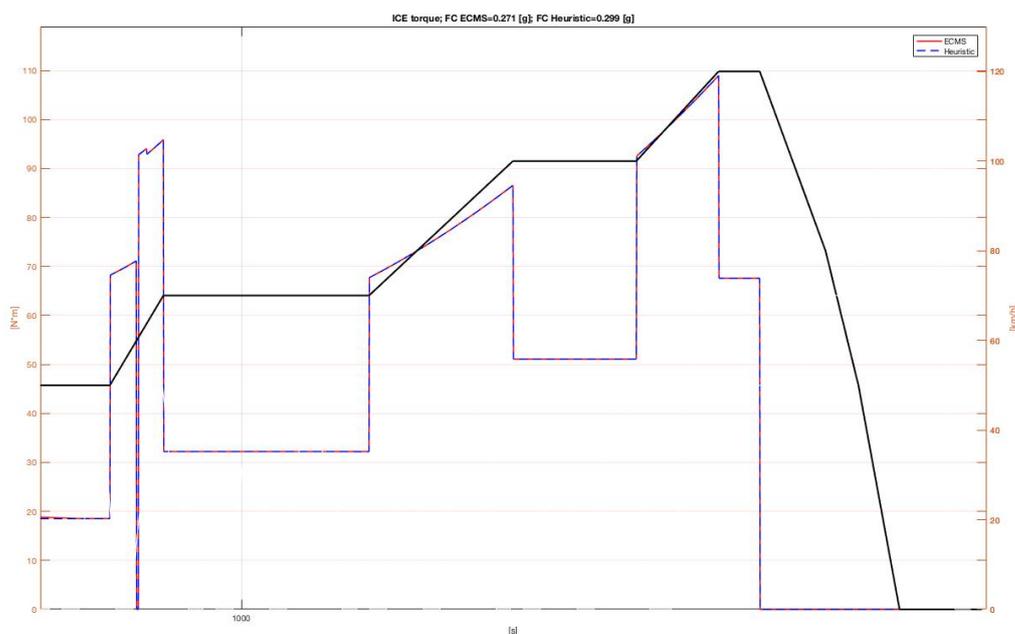


Figura 35 - Coppia del MCI, NEDC, dettaglio ciclo extraurbano

4.1.1.4 Potenza di batteria e consumo orario di combustibile

Di seguito si riportano i risultati relativi alla potenza di batteria e al consumo orario di combustibile. Come visto dalla funzione di costo, questi sono i fattori valutati dalla strategia di ECMS per la minimizzazione dei consumi equivalenti di energia. Questi grafici sono in diretta correlazione con quanto visto per le Figure 30 e 33 e consentono di eseguire una valutazione sull'algoritmo di minimizzazione della ECMS.

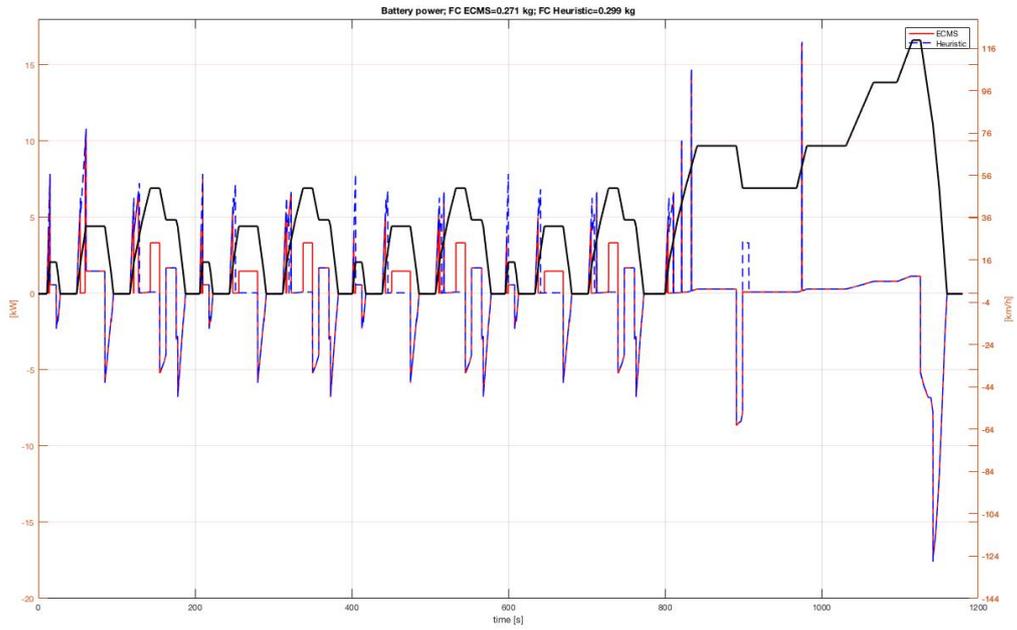


Figura 36 – Potenza alla batteria, NEDC, P3, ECMS vs euristica

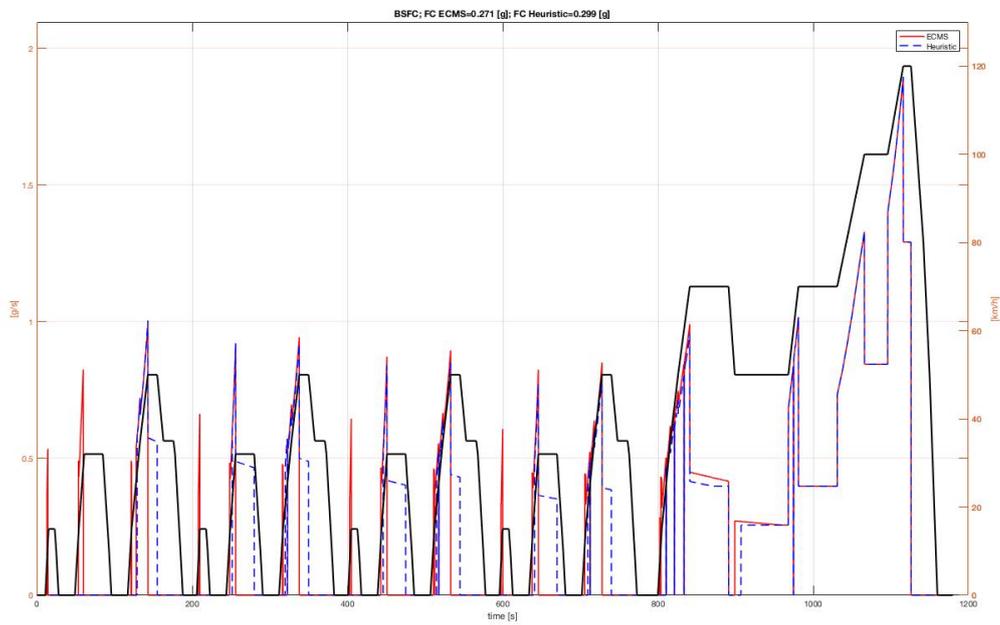


Figura 37 – Consumo specifico, P3, NEDC, ECMS vs euristica

4.1.1.5 Risparmio energetico P3

I risultati di Tabella fanno riferimento al confronto visto tra ECMS e strategia euristica per un HEV in configurazione di P3, sul NEDC.

Tabella 2 - Consumi ECMS, NEDC, P3

Strategia	Consumo [g]	Risparmio sul MCI [%]	Risparmio sull'euristica [%]
Solo MCI	366	-	-
Euristica	299	18,3	-
ECMS	271	25,9	9,4

Tali risultati sono stati ottenuti dallo stesso modello, configurato in maniere diverse ma con la stessa componentistica, pertanto sono da considerare in maniera relativa e non assoluta. In quest'ottica, la ECMS esegue un miglioramento considerevole rispetto ad una strategia euristica. Tale risultato è legato all'architettura di questa configurazione: l'elevato potenziale di rigenerazione di energia associato all'inserimento dell'EMG sul differenziale, con la possibilità di disaccoppiare il MCI dalla catena cinematica in fasi di frenata, permette di avere più libertà dal punto di vista dei consumi durante tutto il ciclo.

4.1.2 Configurazione P1

In questa configurazione il veicolo ibrido elettrico non rientra più nella configurazione di mild HEV ma in quella di micro HEV: la macchina elettrica di riferimento è un BSG, collegato tramite

cinghia sull'albero motore. In merito alla batteria, essa è la stessa utilizzata per l'architettura P3, quindi con caratteristica di tensione pari a 48V.

4.1.2.1 SOC

Un primo risultato che conferma la ripetibilità della ECMS su profili di velocità differenti è la gestione energetica nella prima parte del ciclo, corrispondente ai primi due cicli urbani: la ECMS limita l'impiego della macchina elettrica maggiormente rispetto alla strategia euristica.

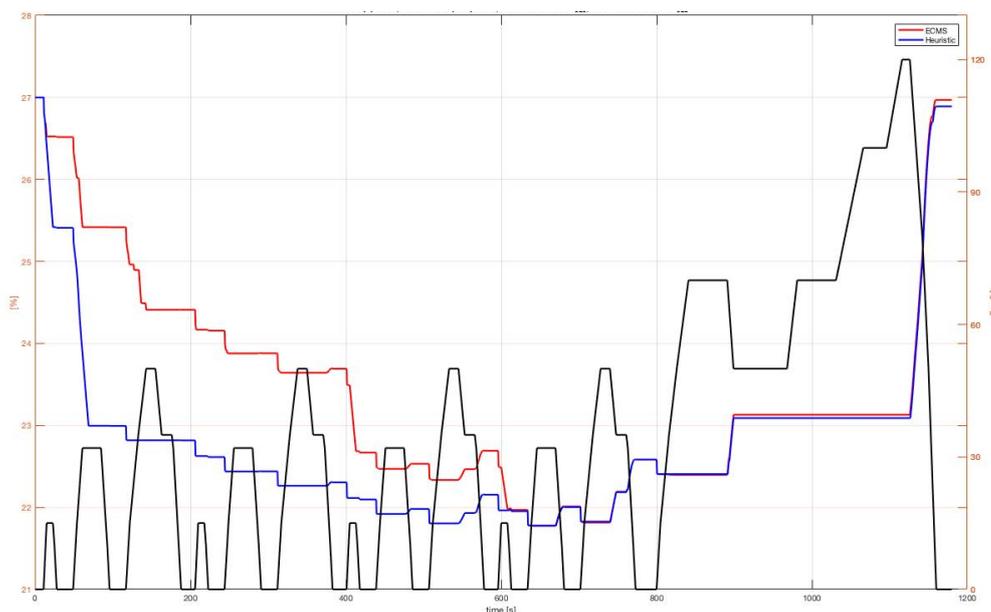


Figura 38 - SOC, WLTP, P1, ECMS vs Euristica

In questo modo è possibile avere una riserva energetica più avanti nel ciclo, dove un impiego della macchina elettrica potrebbe risultare più vantaggioso rispetto ad una guida in puro MCI. Al contrario, la strategia euristica fa uso immediato dell'energia disponibile per eseguire assistenza elettrica alla guida ma

perdendo efficacia nei tratti di ciclo successivi dove la carica disponibile è bassa.

4.1.2.3 Risparmio energetico P1

Questi risultati sono stati ottenuti dalla simulazione del modello HEV in configurazione di P1 sul NEDC.

Tabella 3 - Consumi ECMS, NEDC, P1

Strategia	Consumo [g]	Risparmio sul MCI [%]	Risparmio sull'euristica[%]
Solo MCI	366	-	-
Euristica	343	4,9	-
ECMS	340	6	1,1

Rispetto a quanto visto per la configurazione di P3 il miglioramento relativo tra ECMS ed euristica è decisamente minore. Ciò è da ricercare nel minore potenziale energetico associato ad una configurazione di macchina elettrica solidale al MCI. In questa configurazione non è infatti possibile disaccoppiare i due propulsori. Di conseguenza la fase di frenata rigenerativa sarà meno efficace dal punto di vista della ricarica di batteria a causa delle frizioni del MCI. Inoltre, le caratteristiche tecniche di un BSG sono inferiori in termini di coppia erogabile rispetto ad una macchina elettrica come quella vista nell'impiego su di un P3 pertanto anche il potenziale di miglioramento relativo tra le due strategie è ridotto. Si evidenzia in ogni caso il vantaggio positivo rispetto ad una configurazione dotato di solo MCI, che in questo caso è del 6 %.

4.2 Ciclo WLTP

In questa trattazione si fa riferimento ad un ciclo WLTP di classe 3, per veicoli ad alta potenza. Questo ciclo si suddivide in quattro rampe di velocità: bassa, media, alta ed estremamente alta, come segue:

Tabella 4 - Caratteristiche WLTP

	Bassa	Media	Alta	Molto alta	Totale
Durata [s]	589	433	455	323	1800
Durata Stop [s]	150	49	31	8	235
Distanza [km]	3,095	4,756	7,162	8,254	23,266
Percentuale di stop	26,5%	11,1%	6,8%	2,2%	13,4%
Velocità massima [km/h]	56,5	76,6	97,4	131,3	-
Velocità media senza stop [km/h]	25,3	44,5	60,7	94,0	53,5
Velocità media con stop [km/h]	18,9	39,4	56,5	91,7	46,5
Accelerazione minima [m/s ²]	-1,5	-1,5	-1,5	-1,44	-
Accelerazione massima [m/s ²]	1,611	1,611	1,666	1,055	-

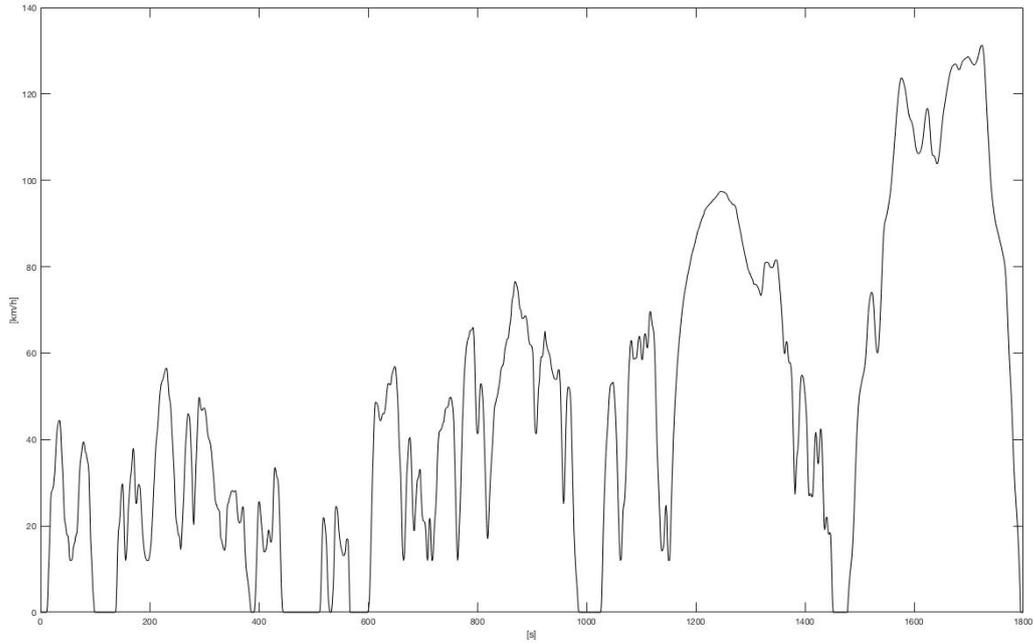


Figura 39 - WLTP

Questo ciclo di guida, a differenza del NEDC, presenta un andamento decisamente più discontinuo della velocità, evidenza accelerazioni frequenti ed elevate. In quest’ottica, un mild HEV con batteria da 48V ha un potenziale di gestione energetica minore. Il profilo di cambio marcia è indicato in Figura 40.

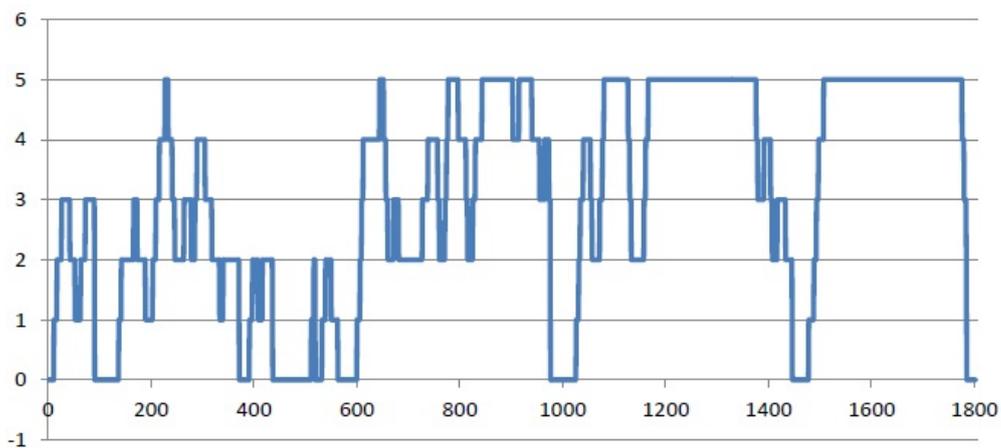


Figura 40 - Profilo di cambio marce per il ciclo di guida WLTP

Anche su questa strategia è implementato il GF. È stimato che questa componente utilizzi il 5% dell'energia della batteria, che si traduce in 14 grammi di carburante consumati.

4.2.1 Configurazione P3

Innanzitutto si analizza il risultato relativo all'andamento del SOC in comparativa con la strategia euristica.

4.2.1.1 SOC

In questo grafico è possibile notare due principali divergenze tra la gestione del SOC delle due strategie.

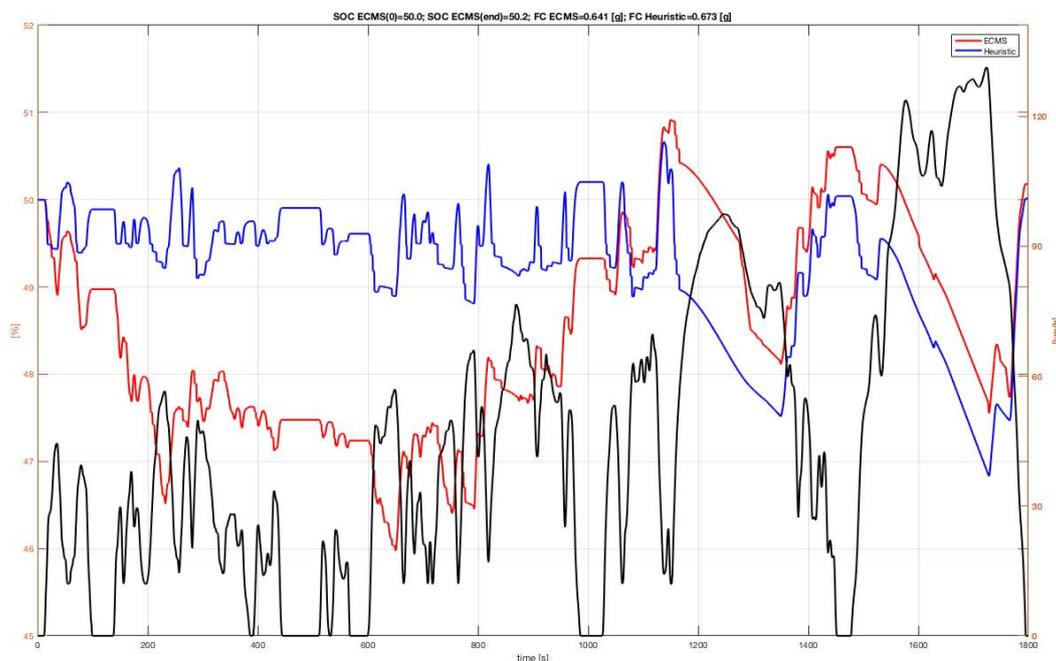


Figura 41 - SOC, WLTP, ECMS vs euristica

La prima differenza è mostrata in Figura 42: la strategia euristica, per come sono definite le regole, segue un andamento costante a velocità medio basse. Al contrario, la ECMS esegue un utilizzo dell'EMG maggiore, il che porta ad un abbassamento del SOC.

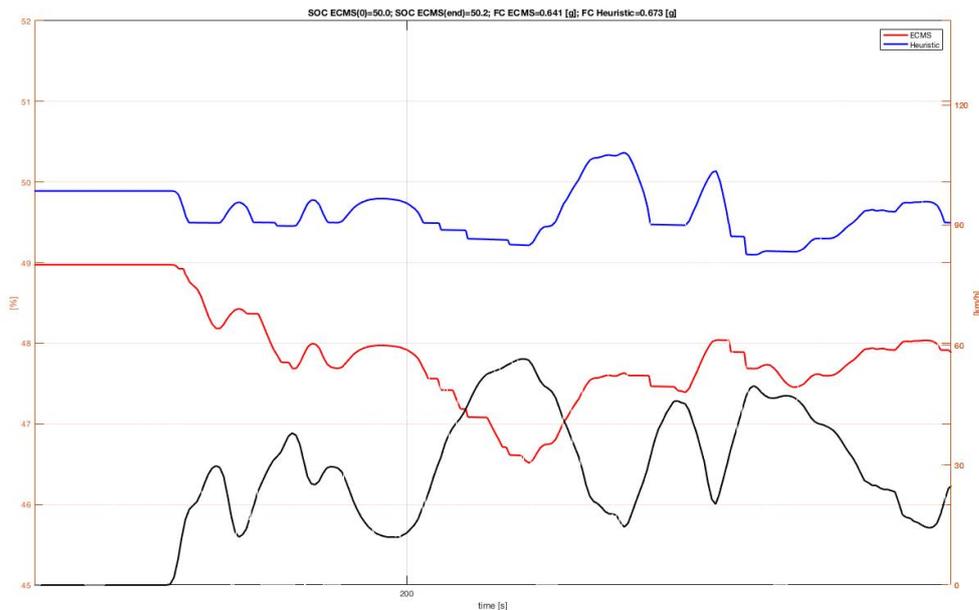


Figura 42 - SOC, WLTP, dettaglio a basse velocità

La seconda differenza è mostrata in Figura 43. Quando il SOC cala sino alla perdita di quattro punti percentuali rispetto al valore di partenza comincia una fase di ricarica che lo riporta ad avvicinarsi al valore della strategia euristica. Infine, nell'ultima rampa di velocità le strategie sono considerevolmente simili in quanto l'elevato carico richiesto non fornisce margini di miglioramento elevati.

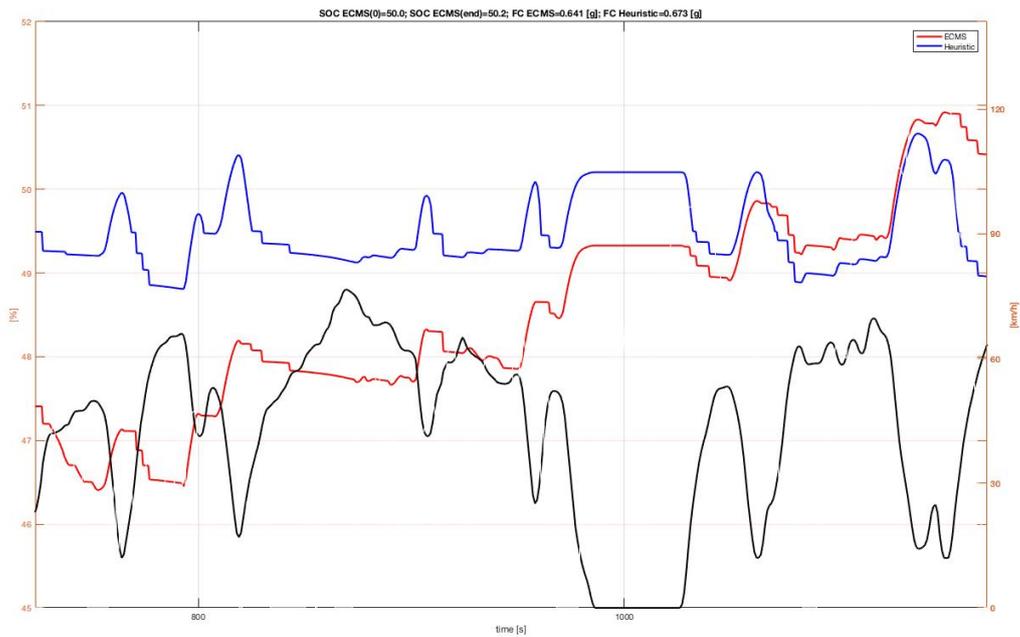


Figura 43 - SOC, WLTP, dettaglio velocità medio elevate

4.2.1.2 Coppia all'EMG

La coppia erogata dalla macchina elettrica secondo la strategia euristica e la ECMS è mostrata in Figura 44:

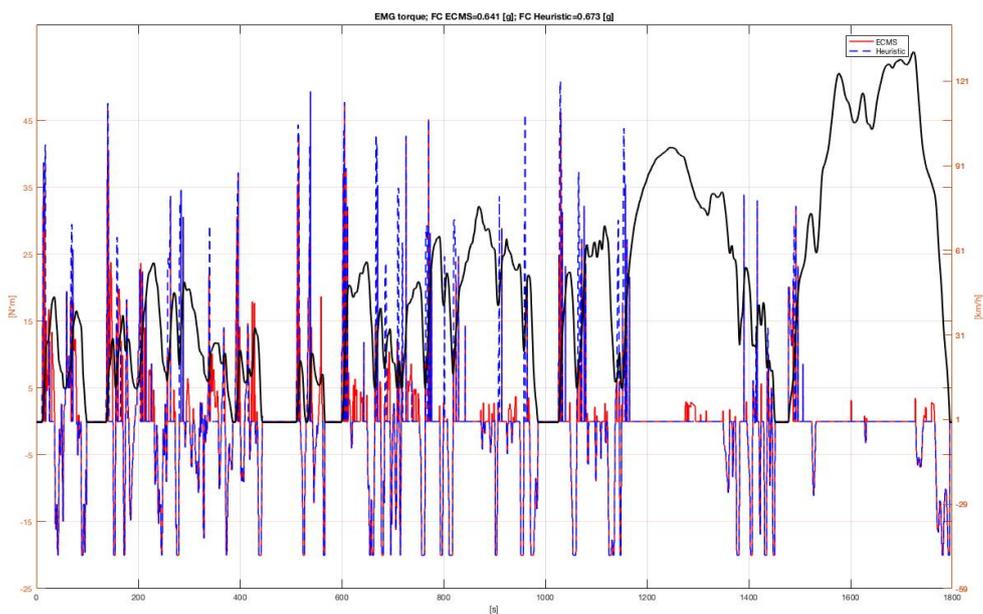


Figura 44 - Coppia del EMG, WLTP

Sono analizzati di seguito i risultati della comparativa tra coppia dell'EMG e del MCI in punti a bassa, media e alta velocità, rispettivamente Figure 45, 46, 47.

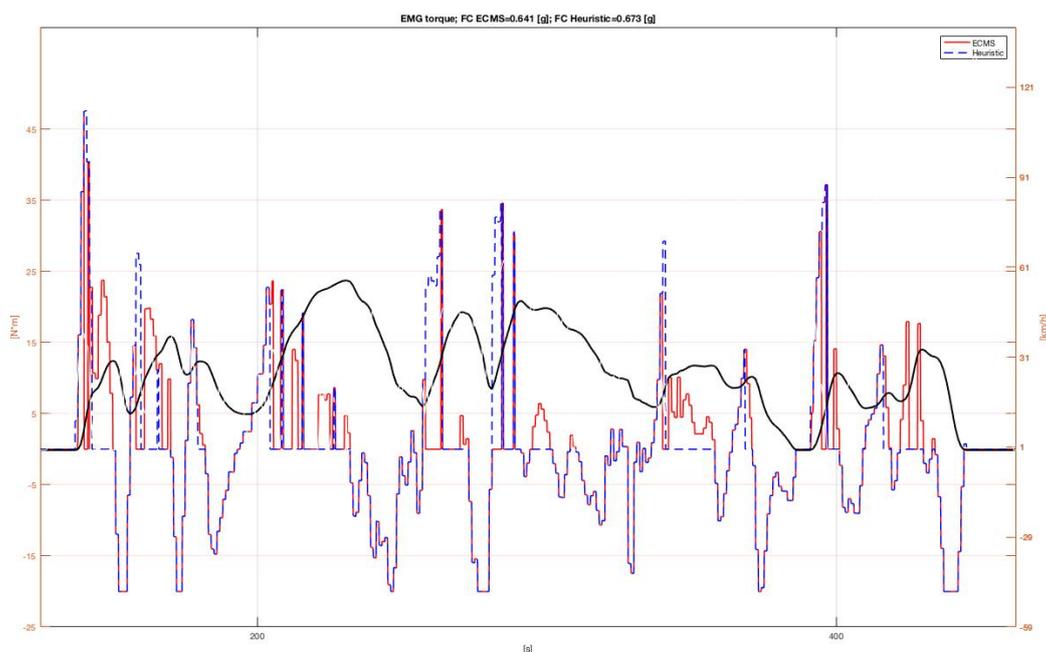


Figura 45 - Coppia EMG, WLTP, basse velocità

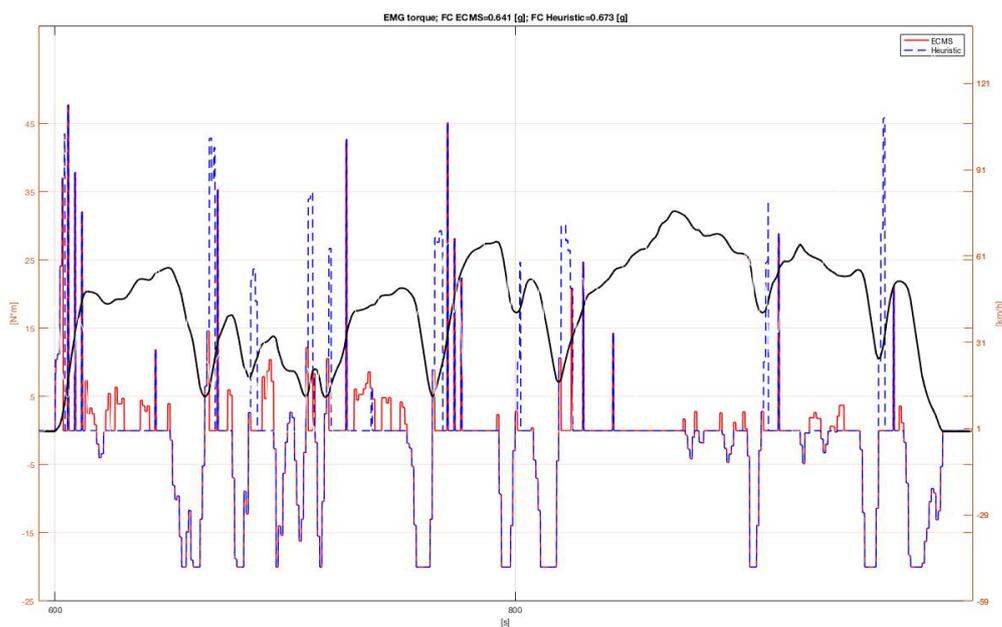


Figura 46 - Coppia EMG, WLTP, medie velocità

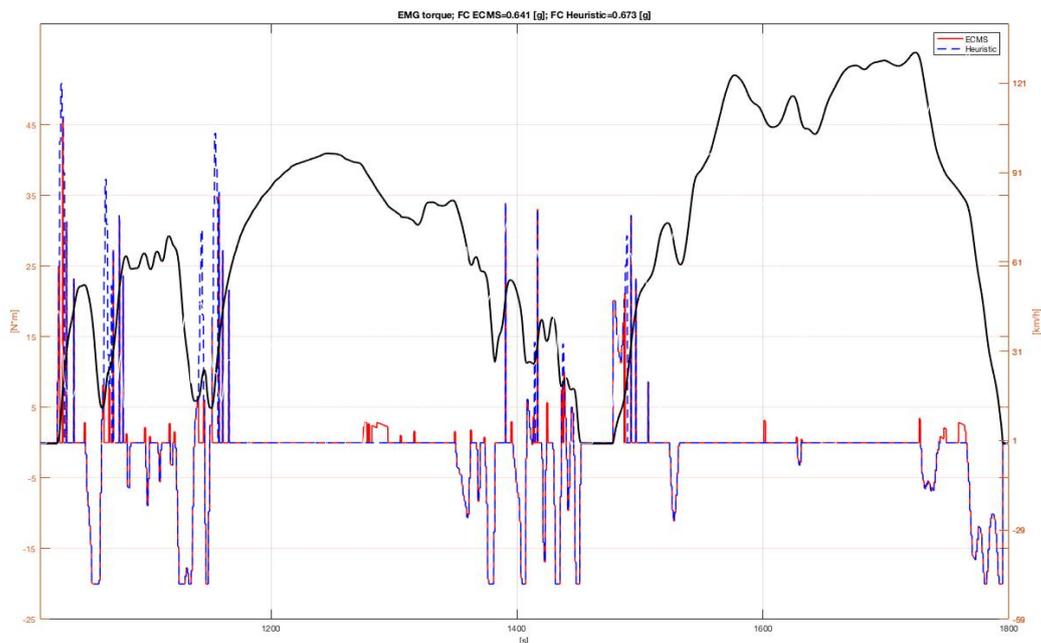


Figura 47 - Coppia EMG, WLTP, alte velocità

Si conferma il risultato visto in Figura 31, ovvero che è energeticamente più conveniente eseguire una trazione elettrica nei punti di velocità costante, mentre non lo è nelle fasi dove ci sono delle accelerazioni elevate. Inoltre, come per il ciclo extra urbano del NEDC anche nel WLTP si conferma una trazione in puro MCI nelle zone di velocità elevate, come visibile in Figura 47 segno che in questi punti la macchina elettrica non fornisce un contributo vantaggioso in termini di coppia ed energia spesa per erogarla.

4.2.1.3 Risparmio energetico

Rispetto a quanto visto per i risultati di questa configurazione sul NEDC il miglioramento relativo della ECMS su questo ciclo è inferiore. Ciò è da ricercare sulla natura del WLTP che, rispetto a quanto visto per il NEDC, è decisamente più discontinuo sulle velocità. La conseguenza diretta di questo fattore è una più difficile

calibrazione della ECMS. Pertanto, nonostante vi sia nientemeno un vantaggio positivo alla strategia euristica, esiste potenziale di sviluppo e miglioramento per la calibrazione ottimale di questa strategia.

Strategia	Consumo [g]	Risparmio sul MCI [%]	Risparmio sull'euristica[%]
Solo MCI	755	-	-
Euristica	673	10,8	-
ECMS	641	15,1	4,75

Tabella 5 - Consumi ECMS, WLTP, P3

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

Durante questo elaborato è stato condotto uno studio riguardante il problema di ottimizzazione dei consumi di una vettura ibrida elettrica. La scelta riguardante l'algoritmo volto a regolare la gestione di potenza tra i due propulsori è ricaduta su di una strategia causale. In particolare è stata analizzata la ECMS la quale ottimizza la gestione della coppia attraverso la valutazione dei consumi energetici equivalenti di MCI e EMG su di un intervallo temporale opportunamente discretizzato.

I cicli di guida analizzati sono stati il NEDC e il WLTP. Il primo è stato scelto in quanto il profilo di velocità è ripetuto nelle fasi urbane e ciò permette un approccio più semplice alla valutazione di un algoritmo di controllo e all'analisi dei risultati. Il secondo ciclo guida è stato scelto per il motivo opposto: la non ripetibilità del profilo di velocità permette di valutare la solidità dei risultati ottenuti su di un ciclo differente dal primo e che si avvicina maggiormente alle condizioni di guida reali.

Lo studio è stato condotto principalmente su di un modello HEV in configurazione di P3, con macchina elettrica accoppiata sull'albero del differenziale, e in configurazione di P1, con BSG accoppiato sull'albero motore. Nel secondo caso le analisi sono preliminari e ulteriori approfondimenti sono possibili.

I risultati ottenuti dalle simulazioni su entrambe le configurazioni forniscono un miglioramento rispetto alla strategia euristica presa in considerazione. In generale, la configurazione dell'HEV in P3 vede dei miglioramenti maggiori rispetto all'euristica. Questo è

dovuto all'impiego di una macchina elettrica con caratteristiche tecniche maggiori e quindi con un maggiore potenziale di sviluppo. Sul NEDC, dove si susseguono quattro cicli urbani ed uno extra urbano, il risparmio percentuale ottenuto dalla simulazione è decisamente maggiore per entrambe le configurazioni rispetto a quello ottenuto per il WLTP. Ciò è da attribuire ad un profilo di velocità con un andamento piuttosto regolare, che rende più facile la calibrazione dell'ECMS.

Invece, sul WLTP le differenze tra ECMS ed euristica si riducono. In parte questo è dovuto alle maggiori velocità e alle brusche richieste di coppia dovute ad un profilo di guida irregolare. In quest'ottica un'architettura di mild HEV ha un potenziale di riduzione dei consumi di entità inferiore rispetto a quanto visto per il NEDC.

Per quanto concerne gli sviluppi futuri, assume rilievo un'ulteriore analisi e investigazione sulla calibrazione e la scelta del corretto fattore di equivalenza. Come visto, la corretta definizione di questo parametro è cruciale in ottica di strategie volte al *charge sustaining*, al fine di calibrarne la gestione energetica della batteria.

Bibliografia

- [1] Van Andel, Tjeerd H. *New Views on an Old Planet: A History of Global Change* (2nd ed.). Cambridge UK: Cambridge University Press. ISBN 0-521-44755-0, 1994.
- [2] IMBIE 2018 Antarctic Dataset, <http://imbie.org/data-downloads/>, 6 Agosto 2018.
- [3] unfccc.int. (2017). The Paris Agreement - main page. [online]: http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php, 9 Marzo 2017.
- [4] Commission Regulation (EU) No 333/2014 of 11 March 2014 amending Regulation (EC) No 443/2009 to define the modalities for reaching the 2020 target to reduce CO2 emissions from new passenger cars, 2014.
- [5] IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

- [6] UNEP (2018). The Emissions Gap Report 2018.
- [7] M. Sniedovich. Dynamic Programming: Foundations and Principles. CRC Press, 2^a edizione, 2011.
- [8] D. Bertsekas. Dynamic Programming and Optimal Control Vol I. Athena Scientific, Belmont, Massachusetts, 3 edition, 2005.
- [9] D. Ambühl. Energy Management Strategies For Hybrid Electric Vehicles, PhD Thesis, ETH Zurich, 2009.
- [10] A. Cerofolini, Optimal Supervisory Control Of Hybrid Vehicles, PhD thesis, University of Bologna, 2014.
- [11] S. Onori, L. Serrao, and G. Rizzoni. ECMS as a realization of Pontryagin's minimum principle for HEV control. Control Conference, 2009. ACC', 2009.
- [12] S. Onori, L. Serrao, G. Rizzoni. Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Hybrid Electric Vehicles. Proceedings of the ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference, DSCC, 2010.
- [13] A. Doyle. https://www.weforum.org/agenda/2019/02/last-year-was-fourth-hottest-on-record-outlook-sizzling-un?utm_source=Facebook%20Videos&utm_medium=Facebook%20Videos&utm_campaign=Facebook%20Video%20Blogs, Thomson Reuters Foundation, 2019.
- [14] A. Moro, L. Lonza. Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles. Transportation Research Part D 64, European Commission, Joint Research Centre (JRC), 2018.
- [15] J. Van Mierlo, M. Messagie, S. Rangaraju. Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment. World Conference on Transport Research (WCTR), Shanghai, 2016.

- [16] A. Moro, E. Helmers. A new hybrid method for reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles. *Int J Life Cycle Assess* (2017) 22:4–14 DOI 10.1007/s11367-015-0954-z, 2015.
- [17] M. Weiss, A. Zerfass, E. Helmers. Fully electric and plug-in hybrid cars – An analysis of learning rates, user costs, and costs for mitigating CO₂ and air pollutant emissions. *Journal of Cleaner Production* 212 (2019) 1478-1489, 2019.
- [18] "Agreement concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions", Addendum 100: Regulation No. 101, UNECE, UN. Last updated 12 April 2013.
- [19] "Global Technical Regulation No. 15 (Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedure)", UNECE, UN. Retrieved, 2014.