

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Corso di Laurea Magistrale in
INGEGNERIA MECCANICA

**OTTIMIZZAZIONE DELLA STRATEGIA
DI CONTROLLO DI UN VEICOLO IBRIDO
ORIENTATA ALLA RIDUZIONE CONSUMI**

Tesi di Laurea Magistrale in
MODELING AND CONTROL OF INTERNAL COMBUSTION
ENGINES AND HYBRID PROPULSION SYSTEMS

RELATORE:
Prof. Ing. Nicolò Cavina

PRESENTATA DA:
Lorenzo Tambini

CORRELATORI:
Ing. Marco Cappa
Ing. Daire Corrigan
Ing. Roberto Tonelli
Prof. Ing. Enrico Corti
Prof. Ing. Davide Moro

SESSIONE III
ANNO ACCADEMICO 2018/2019

Sommario

1.	Introduzione	2
1.1.	Procedura di omologazione WLTP	4
1.2.	Introduzione e principali vantaggi dei veicoli ibridi	12
1.3.	Sistemi di propulsione ibridi	20
1.4.	Architettura VF1	33
1.5.	Architettura VF2	35
1.6.	Differenze tra le due architetture	35
2.	Modello Simulink	37
2.1.	Analisi di sensibilità	39
2.2.	Sviluppo strategie di controllo	49
3.	Sintesi risultati	63
3.1.	VF1: nuova strategia eDrive 1	64
3.2.	VF1: nuova strategia eDrive 2	66
3.3.	VF2: nuova strategia eDrive	73
4.	Analisi energetica	81
4.1.	Tool di post-processing per confronto simulazioni	81
4.2.	Split consumi VF1	87
4.3.	Split consumi VF2	90
5.	Prove sperimentali	93
5.1.	Test banco prova	93
5.1.1.	Confronto tra simulazioni e test sperimentali banco prova	100
5.2.	Test su banco a rulli VF1	103
5.2.1.	Confronto tra simulazioni e test sperimentali banco a rulli	106
6.	Conclusioni	114

1. Introduzione

Nel corso degli ultimi anni si è data sempre più attenzione all'evoluzione della mobilità elettrica non solo per i progressi tecnologici messi in campo dalle imprese e dagli enti di ricerca ma anche per l'evidente impatto presente e futuro nella nostra vita di tutti i giorni. Nell'ultimo ventennio varie sono state le soluzioni ipotizzate, ciò nonostante l'ibridizzazione sembra attualmente la soluzione tecnica più promettente per raggiungere i traguardi di superiore efficienza energetica. I veicoli ibridi elettrici garantiscono elevata flessibilità operativa con potenzialità di ridurre in maniera significativa le emissioni nocive e il consumo rispetto a un veicolo convenzionale; tuttavia la superiore efficienza energetica può essere raggiunta solo a patto che tutti i componenti del sistema di propulsione cooperino in sinergia. Questo richiede lo sviluppo di una strategia di controllo avanzata capace di ottimizzare il flusso di potenza tra le macchine.

Il seguente lavoro di tesi si occupa dell'ottimizzazione della strategia di controllo di un veicolo ibrido ad alte prestazioni al fine di ridurre i consumi e le emissioni, senza penalizzare però le performance e la guidabilità: in particolare si prenderà come riferimento la procedura di omologazione WLTP. La vettura ibrida plug-in in questione è la Ferrari SF-90 stradale, denominata in questo elaborato con la sigla VF1. La SF-90 Stradale rappresenta una prima assoluta in termini di powertrain: per la prima volta su una vettura Ferrari di gamma, infatti, viene proposta un'architettura ibrida di tipo PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) in cui il motore endotermico viene integrato a tre motori elettrici. Il motivo più importante che ha spinto all'introduzione dell'ibrido ricaricabile riguarda principalmente l'aumento di prestazioni: è la prima vettura Ferrari a superare la potenza complessiva di mille cavalli. Questo obiettivo di prestazioni ha portato a fare scelte tecniche molto precise: quella del V8 turbocompresso, quella della trazione integrale elettrica che dà maggiore guidabilità, maggiori performance, ma anche maggiore piacere di guida; con questo progetto sono peraltro soddisfatti quei clienti che vogliono muoversi in ambito urbano a zero emissioni. Questo veicolo è la dimostrazione di come le conoscenze acquisite attraverso le competizioni hanno trovato immediata applicazione su

di una vettura Ferrari di produzione e, come tale, è chiamata a garantire determinati standard in termini di prestazioni e velocità.

Nella prima parte di questa tesi ci si concentrerà dunque sull'ottimizzazione della strategia di controllo di questa vettura per poi passare all'ottimizzazione di un'altra vettura, la VF2 che presenta un'architettura diversa, per poi confrontare le due e metterne in luce le differenze, i vantaggi e gli svantaggi principali delle due diverse architetture.

L'obiettivo principale di questa analisi consiste nella riduzione dei consumi tramite la calibrazione di certi parametri che influenzano la gestione del powertrain e l'implementazione e la modifica delle regole su cui si basa la strategia di controllo. Utilizzando un modello nell'ambiente Simulink, un tool di Matlab, è possibile simulare il comportamento della vettura e stimarne i consumi in una procedura di omologazione WLTP. Una volta identificati i parametri più importanti ed influenti viene creata una matrice di punti di simulazione in modo da avere un'informazione completa nei risultati ed ottenere un'analisi di sensibilità per ognuno di questi. In questo modo si può determinare l'effetto che un certo parametro produce sul risultato finale: questo metodo è necessario per poter procedere all'ottimizzazione di un modello tramite variabili che non hanno una relazione lineare con il risultato e non sono direttamente correlati.

La strategia ottimale viene ricercata tramite simulazioni iterative che si pongono l'obiettivo della ricerca di un minimo: si utilizza un approccio di tipo «forward» dove, assunto a priori un ciclo di guida, viene definito il comportamento dinamico del pilota, della vettura e di tutti i suoi componenti (e delle mutue interazioni tra loro) affinché si segua il ciclo, in questo caso WLTC.

Dopodiché si identificheranno le configurazioni che risultano avere le prestazioni che garantiscano il soddisfacimento delle specifiche iniziali imposte e che siano commercialmente più favorevoli, lato guidabilità; infine, per validare i risultati delle simulazioni, si effettueranno dei test sperimentali al banco prova, al banco a rulli e su strada per confermare i risultati ottenuti. Nella parte finale dell'elaborato questi verranno poi confrontati con le simulazioni effettuate in un ambiente virtuale e verranno messi in luce gli aspetti più importanti del confronto e le principali differenze.

1.1. Procedura di omologazione WLTP

Per poter essere omologate tutte le auto di nuova generazione devono superare una serie di test che ne determinino i consumi e le emissioni. Negli ultimi anni, soprattutto in virtù della lotta all'inquinamento, le norme in materia sono diventate sempre più stringenti.

La procedura di prova per veicoli leggeri armonizzata a livello mondiale, comunemente chiamata WLTP (*Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure*), definisce una norma armonizzata globale per determinare i livelli di inquinanti ed emissioni di CO₂ sia per la gamma di veicoli tradizionali sia per veicoli ibridi ed elettrici. È una nuova procedura di prova vincolante per tutti i produttori di automobili, finalizzata a determinarne i dati relativi a emissioni e consumo di carburante: il nuovo ciclo di prova WLTP sostituirà gradualmente il NEDC (*New European Driving Cycle*), la vecchia procedura di omologazione, e grazie all'utilizzo di condizioni di prova prossime a quelle effettive, assicurerà valori di maggiore utilità pratica. Le misurazioni di CO₂ derivanti dai test WLTP verranno incluse nel certificato di conformità del veicolo e saranno oggetto di verifica da parte delle case automobilistiche per controllarne la corrispondenza con gli obiettivi di CO₂ fissati dall'Unione Europea. Inoltre, in molti paesi, i nuovi risultati del test sulle emissioni di CO₂ saranno presi in considerazione per il calcolo della tassazione di immatricolazione e bollo.

Il nuovo ciclo è più articolato e frastagliato del precedente: in tal modo si spera di colmare almeno parzialmente il divario da molti osservato fra le emissioni rilevate durante il NEDC e quelle durante l'utilizzo reale su strada, con forti incrementi nel caso di utilizzo su strada. La transizione dal NEDC al WLTC dovrebbe aumentare ulteriormente la convenienza e l'impatto ambientale dei veicoli elettrici, sia perché gli azionamenti elettrici sono meno soggetti dei motori a combustione interna a deterioramento dell'efficienza al variare del punto di lavoro, sia perché la maggiore variabilità del ciclo comporta maggiori opportunità dello sfruttamento del recupero di energia in frenata da parte dei veicoli elettrici.

Oltre alla procedura WLTP, la Commissione Europea applicherà anche il nuovo ciclo Real Driving Emission (RDE), considerandolo requisito supplementare per la EU6d Emission

Regulation, la prima tappa del processo di adozione. A differenza dei test NEDC e WLTP, i test Real Emissions Driving misureranno gli inquinanti durante la prova del veicolo su strada, consentendo così di confermare se anche i risultati dei test di laboratorio rispecchiano le normali condizioni di utilizzo. Il test RDE verrà eseguito su un insieme rappresentativo di modelli testati per mezzo di una tecnologia di misurazione delle emissioni mobili, il cosiddetto PEMS (*Portable Emissions Measurement System*), riferita alla guida su strada in tempo reale. A causa della larga dispersione nella rilevazione su strada, il consumo di carburante e le emissioni di CO₂ non vengono considerati, ma solo le emissioni di sostanze inquinanti.

Per omologare una nuova autovettura o un veicolo commerciale leggero la nuova procedura di omologazione WLTP è stata **gradualmente utilizzata in tutta l'Unione Europea** a partire dal 1° settembre 2017 in sostituzione del precedente test NEDC. Rispetto al NEDC, alla quale si sostituisce in modo definitivo da settembre 2018, la nuova procedura per l'immatricolazione delle automobili in Unione Europea WLTP è molto più realistica e rispecchia più fedelmente l'uso pratico e lo stile di guida su strada: vengono considerati gli ausiliari, come ad esempio l'aria condizionata, e i possibili equipaggiamenti aggiuntivi che possono causare un aumento dei consumi derivante da un aumento di peso della vettura o da una maggiore resistenza aerodinamica.



Figura 1 - Transizione tra procedura di omologazione NEDC e WLTP

Le differenze fondamentali tra un ciclo WLTC e NEDC sono le seguenti:

- Più dinamico e meno condizioni al minimo;
- Più lungo sia in termini di tempo, da 20 a 30 minuti, sia di distanza, da 11 a 23 km circa;
- Più veloce: da 34 a 46 km/h di velocità media e da 120 a 131 km/h di velocità massima;

- Cicli per 4 diverse classi di veicoli (basate sul rapporto potenza/peso e sulla massima velocità) e punti di cambiata individuali per ogni tipo di veicolo a trasmissione manuale;
- Temperatura del test: 23°C e 14°C;
- Test di veicoli “Low CO₂” & “High CO₂”: si riferiscono rispettivamente ad una più alta e ad una più bassa resistenza della strada, considerando sia la massa del veicolo che la resistenza aerodinamica (coastdown);
- Ottimizzata sequenza di analisi bag (calibrazione e controlli una volta a test);
- Flusso di energia elettrica valutata anche per la batteria a 12V;
- Per vetture a bassa potenza con problemi di guidabilità viene scalata la curva di velocità.

Pur rispecchiando in maniera più fedele l'utilizzo reale di un veicolo, in realtà i consumi e le emissioni di CO₂ dipendono da una serie di fattori che non possono essere ricostruiti in laboratorio con il test WLTP. I diversi stili di guida, per esempio, costituiscono uno di questi fattori: ciò significa che se due driver guidano su strada lo stesso veicolo nelle medesime condizioni, si registreranno valori diversi perché avranno uno stile di guida diverso. Inoltre vengono effettuati test WLTP per ogni tipo di allestimento che un veicolo può avere: gli optional possono alterare il peso o l'aerodinamica del veicolo e quindi influenzarne il consumo di carburante e le emissioni e per questo c'è la necessità di effettuare diversi cicli per ognuna delle possibili configurazioni.

I veicoli nell'Unione Europea, secondo la “*Regulation (EU) 2018/858 (European Commission 2018b) Chapter I Article 4*”, vengono distinti in due principali categorie:

- **Categoria M:** consiste dei veicoli a motore adibiti al trasporto di passeggeri, divisa in 3 sottocategorie:
 - **M1:** veicoli con non più di 8 sedili in aggiunta al sedile del conducente;
 - **M2:** veicoli con più di 8 sedili in aggiunta al sedile del conducente con una massa massima che non supera le 5 tonnellate, considerando inoltre i veicoli con spazio per persone in piedi;

- **M3**: veicoli con più di 8 sedili in aggiunta al sedile del conducente con una massa massima che supera le 5 tonnellate, considerando inoltre i veicoli con spazio per persone in piedi.
- **Categoria N**: consiste di veicoli a motore adibiti al trasporto di beni, divisa in 3 sottocategorie:
 - **N1**: veicoli con una massa massima che non eccede i 3500 kg;
 - **N2**: veicoli con una massa massima tra i 3500 kg e i 12000 kg;
 - **N3**: veicoli con una massa massima che eccede i 12000 kg.

A seconda della massima potenza specifica (rapporto potenza/peso dove la potenza nominale del motore è in W e il peso a vuoto in kg a cui vengono sottratti 75 kg) erogabile del veicolo da omologare e della velocità massima vi sono 3 diverse classi di veicoli, rispettivamente con 3 diversi cicli:

- WLTC Classe 1: veicoli a bassa potenza → $PMR \leq 22 \text{ W/kg}$
- WLTC Classe 2: veicoli a media potenza → $22 \text{ W/kg} < PMR \leq 34 \text{ W/kg}$
- WLTC Classe 3: veicoli ad alta potenza → $PMR > 34 \text{ W/kg}$

La vettura presa in considerazione per questo lavoro di tesi ha una potenza complessiva superiore a 34 W/kg: ricade quindi in classe 3 e bisogna seguire la terza traccia di velocità la quale è caratterizzata da 4 zone:

- a bassa velocità (fino a 56,5 km/h – 589 s)
- a medio-bassa velocità (fino a 76,6 km/h – 433 s)
- a medio-alta velocità (fino a 97,4 km/h – 455 s)
- ad alta velocità (fino a 131,3 km/h – 323 s)

Ognuna di queste fasi rappresenta rispettivamente la guida urbana, extra-urbana, campestre ed autostradale; le zone a bassa-media velocità hanno una durata complessiva quasi uguale a quella delle zone ad alta velocità.

Di seguito le 3 diverse tracce di velocità vettura su base tempo da seguire durante il ciclo di omologazione.

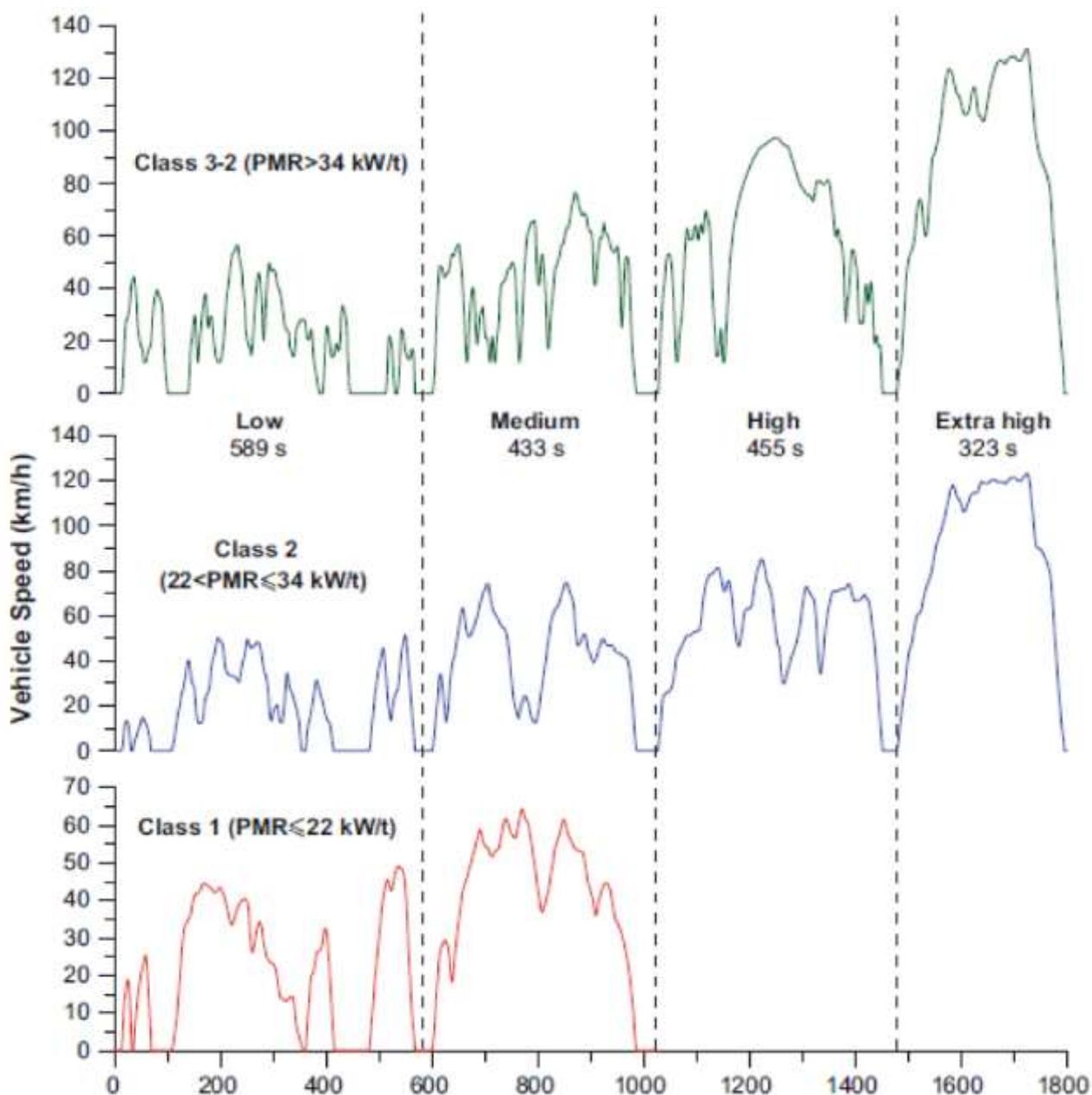


Figura 2 - Tracce di velocità per le diverse classi (test di omologazione WLTP)

La procedura di omologazione WLTP per un veicolo ibrido è composta da due cicli WLTC: il primo in Charge Depleting (CD) e il secondo in Charge Sustaining (CS); la durata di un singolo ciclo dura circa 1800 secondi nel quale si percorre la distanza di 23 chilometri circa.

Si effettua prima il ciclo in CD: partendo da una condizione a batteria carica (pari al 100% relativo) si lascia scaricare completamente la batteria ad alto voltaggio seguendo il profilo di velocità noto: si percorre quindi la prima parte del ciclo in guida puramente elettrica;

una volta scaricata completamente la batteria si prosegue in modalità ibrida per concludere il primo ciclo e si lascia raffreddare la vettura il tempo necessario (circa 6 ore). Viene poi effettuato il secondo ciclo in CS nel quale vi è un vincolo da rispettare: la carica di entrambe le batterie, ad alto e a basso voltaggio, con cui si inizia deve essere uguale alla carica a fine ciclo (con una certa tolleranza); se il valore di carica a fine ciclo CD non permette di concludere il ciclo CS rispettando il vincolo di pari carica viene effettuato un altro ciclo CD in modo da avere una condizione di carica ad inizio ciclo CS tale per cui si riesca a concludere la procedura rispettando il principale vincolo di uguale carica ad inizio e fine del ciclo CS.

Per entrambi i cicli vengono campionati i valori di CO₂ emessa per ogni singola fase per poi combinare i due cicli e trovare un valore di CO₂ equivalente (CO₂ ciclo combinato) tramite la seguente formula:

$$m_{CO_2\text{combinato}} = \left(\sum_i m_{CO_2CDi} * UF_i \right) + \left(1 - \sum_i UF_i \right) * m_{CO_2CSi}$$

Ogni ciclo è diviso in 4 fasi e per ognuna di queste viene campionata la massa di CO₂ e viene ricavato l'Utility Factor (UF) che stabilisce come viene utilizzata la guida in eDrive; questo fattore è funzione dell'electric range e varia da 0 ad 1: maggiore sarà l'electric range e maggiore sarà l'UF.

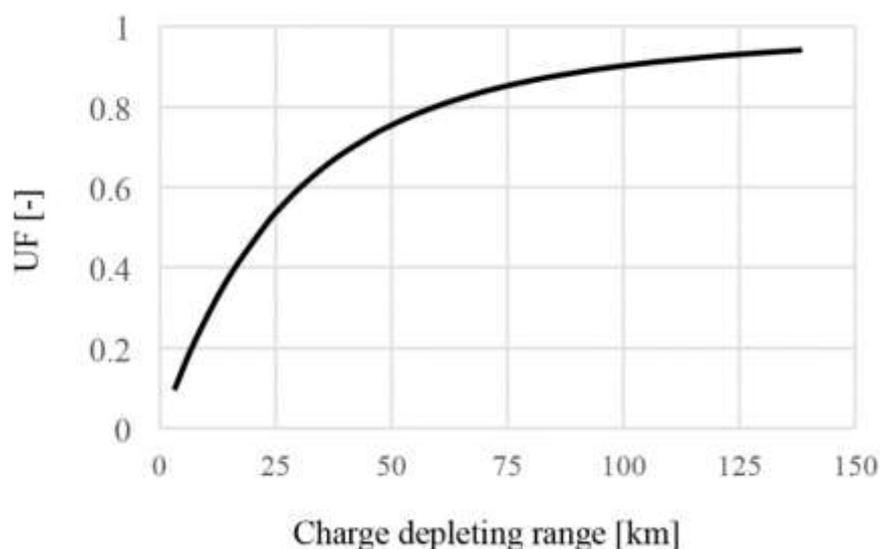


Figura 3 - Andamento Utility Factor in funzione del range elettrico in charge depleting

Considerando che nel primo test in *charge depleting* l'emissione di CO₂ sarà molto limitata posso considerare questo approccio favorevole per le vetture ibride dato che la CO₂ equivalente è ridotta dal range in guida puramente elettrica: maggiore sarà la distanza percorsa in eDrive e minore sarà l'emissione di CO₂ equivalente. Quindi si deve fare in modo di utilizzare la guida eDrive nella maniera più efficiente possibile, senza andare però a compromettere i consumi.

Di seguito viene riportata la tabella dei limiti di inquinanti Euro 6d.

Tabella 1 - Limiti emissioni inquinanti Euro 6d

Euro 6d limits (European Commission 2007, 2008, 2012a)

Emissions	Class M, N1 I		Class N1 II		Class N1 III, N2	
	PI	CI	PI	CI	PI	CI
THC (mg/km)	100	-	130	-	160	-
NMHC (mg/km)	68	-	90	-	108	-
NOx (mg/km)	60	80	75	105	82	125
HC+NOx (mg/km)	-	170	-	195	-	215
CO (mg/km)	1000	500	1810	630	2270	740
PM (mg/km)	4.5 ⁽¹⁾	4.5	4.5 ⁽¹⁾	4.5	4.5 ⁽¹⁾	4.5
PN (#/km)	6.0·10 ¹¹ ⁽¹⁾	6.0·10 ¹¹	6.0·10 ¹¹ ⁽¹⁾	6.0·10 ¹¹	6.0·10 ¹¹ ⁽¹⁾	6.0·10 ¹¹

Notes: (1) PI engine standard applies to DI only

I test della procedura di omologazione riguardano emissioni regolamentate che comprendono biossido di carbonio (CO₂), ossidi di azoto (NOx), particolato (PM), numero di particelle (PN), monossido di carbonio (CO) e idrocarburi non metani (NMHC). I limiti di CO₂ per LDV (Light Duty Vehicles) sono definiti nella *“Regulation (EU) 1014/2010 (European Commission 2010)”*, relativo al monitoraggio e alla comunicazione dei dati relativi all'immatricolazione delle autovetture nuove. Fino all'anno 2020 i limiti di CO₂ per WLTP sono stati ripresi dal NEDC con un metodo di correzione (CO2MPAS) basato su simulazioni. Poiché questi valori vengono misurati in modo più realistico rispetto a quanto accadeva in precedenza, è prevedibile che i dati relativi al consumo e alle emissioni CO₂ dei veicoli con motori a combustione siano aggiornati al rialzo. I limiti di CO₂ relativi al NEDC impostati per il 2020 sono pari a 95 g/km per veicoli passeggeri e 147 g/km per veicoli commerciali leggeri. Dal 2020 in avanti il target di CO₂

sarà basato sulla procedura WLTP: questi limiti saranno ricavati tramite il calcolo della media dei consumi delle macchine vendute nell'Unione Europea nell'anno precedente, dal quale verranno esclusi il 5% delle vetture che hanno maggiori consumi.

L'UE ha deciso di applicare limiti di CO₂ ambiziosi per il periodo che va fino all'anno 2030, con un target intermedio per il 2025. La riduzione dei limiti di CO₂ comparati ai limiti WLTP del 2020 sono i seguenti:

- PC (Passenger Cars): 15% fino al 2025 e 37.5% per il 2030;
- LCV (Light Commercial Vehicles): 15% fino al 2025 e 31% per il 2030.

Sono limiti molto bassi che determinano scenari drammatici sia per veicoli tradizionali con motore a combustione interna sia per veicoli ibridi.

Se la procedura WLTP è stata adottata a livello internazionale, la tassazione dei veicoli rimane una questione prettamente nazionale: se l'obiettivo individuale delle emissioni medie di CO₂ della flotta di automobili nuove non è raggiunto bisogna pagare una sanzione basata sulla differenza tra il consumo effettivo e la soglia limite; inoltre quest'ultimo dipende in modo diretto anche dal numero di macchine vendute.

Calculation of the Excess Emissions Premium (EEP)

EE=Excess Emissions. N=number of new passenger cars (sold in the EU by the manufacturer)

The average specific emissions (ASE) of CO ₂ exceed the specific emission target (SET) by... gCO ₂ /km	Formulae
From 2012 until 2018	
more than 3	$EEP [€] = [(EE - 3 \text{ gCO}_2/\text{km}) \times 95€ \text{ per gCO}_2/\text{km} + 1 \text{ gCO}_2/\text{km} \times 25€ \text{ per gCO}_2/\text{km} + 1 \text{ gCO}_2/\text{km} \times 15€ \text{ per gCO}_2/\text{km} + 1 \text{ gCO}_2/\text{km} \times 5€ \text{ per gCO}_2/\text{km}] \times N$
more than 2 but less than 3	$EEP [€] = [(EE - 2 \text{ gCO}_2/\text{km}) \times 25€ \text{ per gCO}_2/\text{km} + 1 \text{ gCO}_2 \times 15€ \text{ per gCO}_2/\text{km} + 1 \text{ gCO}_2 \times 5€ \text{ per gCO}_2/\text{km}] \times N$
more than 1 but less than 2	$EEP [€] = [(EE - 1 \text{ gCO}_2/\text{km}) \times 15€ \text{ per gCO}_2/\text{km} + 1 \text{ gCO}_2/\text{km} \times 5€ \text{ per gCO}_2/\text{km}] \times N$
less than 1	$EEP [€] = (EE \times 5€ \text{ per gCO}_2/\text{km}) \times N$
From 2019 onwards	
$EEP [€] = (EE \times 95€ \text{ per gCO}_2/\text{km}) \times N$	

Figura 4 - Calcolo del premio per eccesso di emissioni

Dal 2019 il premio è diventato molto oneroso rispetto al passato e può diventare un problema nel caso in cui si superi abbondantemente il limite imposto dall'omologazione. Ogni casa costruttrice dovrà dimostrare alla fine di ogni anno che l'insieme delle auto

vendute raggiunga un valore medio di emissioni corrispondente a quanto richiesto dal regolamento: tale valore viene calcolato tenendo conto del numero delle auto vendute. Qualora l'obiettivo annuale non venga raggiunto, i costruttori saranno sanzionati dalla Commissione Europea con una multa unitaria che sarà pari a 95 euro per grammo di CO₂ di superamento moltiplicata per il numero di auto vendute. Peraltro, per non penalizzare alcuni produttori, è stato raggiunto un accordo che permette di calcolare la media ponderata solo sul 95% delle auto vendute, esentando un certo numero di vetture sportive o comunque caratterizzate da elevati livelli di emissioni.

Queste problematiche dovute a limiti di emissioni imposte da omologazioni sempre più stringenti è una delle principali motivazioni dell'avvento di veicoli ibridi nella gamma di molte case automobilistiche data la minor emissione di CO₂ su ciclo combinato, e quindi la possibilità di omologare la vettura con valori di CO₂ molto più bassi rispetto ad un veicolo tradizionale.

1.2. Introduzione e principali vantaggi dei veicoli ibridi

La mobilità elettrica è diventata una delle sfide che, a partire dal settore della ricerca fino all'industria e alle pubbliche amministrazioni, si stanno affrontando come elemento imprescindibile per la lotta all'inquinamento, migliorando al contempo la mobilità stessa sia a livello locale, sia sulla lunga percorrenza. Tradizionalmente i mezzi elettrici sono stati impiegati fin dal principio nell'ambito ferroviario, metropolitano e tranviario, potendo in quel caso disporre di una linea di alimentazione dedicata resa possibile dalla guida vincolata offerta dai binari. Il trasporto collettivo basato sull'utilizzo di mezzi elettrici è diventato fondamentale nella mobilità urbana sia perché si adatta meglio agli spazi disponibili sia perché non è causa di inquinamento locale in aree già compromesse da altre attività antropiche intensive. Infatti i veicoli elettrici come treni, tram e metropolitane sono da sempre quelli più efficienti dal punto di vista energetico e sostenibili da quello ambientale. I notevoli progressi compiuti nella ricerca di nuove tecnologie per le batterie stanno portando alla costruzione di veicoli che come prestazioni di autonomia e di potenza si avvicinano sempre più ai veicoli tradizionali con motore endotermico, ma col vantaggio di ridurre drasticamente i costi di manutenzione ed esercizio. In questo ambito,

tutte le case automobilistiche propongono oggi modelli di automobili elettriche nei diversi segmenti che, anche come prezzo di acquisto, sono sempre più appetibili per una diffusione di massa.

Uno degli aspetti più critici della mobilità elettrica sono le soluzioni per la ricarica: infatti, quando si parla di e-mobility l'attenzione tende a concentrarsi sulle automobili, sulle loro prestazioni e sull'autonomia, trascurando la ricarica della batteria e tutte le tecnologie, gli impianti e le infrastrutture che la rendono possibile. La diffusione di massa nel breve-medio periodo di veicoli elettrici stradali a batteria può causare diverse problematiche legate alla necessità di creare infrastrutture per la loro ricarica, non solo come installazione di punti di ricarica, ma anche come necessità di disporre di una rete elettrica in grado di erogare la potenza richiesta. In questo senso è sempre più impellente la necessità di un coordinamento a livello nazionale ed europeo che possa rendere le diverse infrastrutture di ricarica interoperabili ed accessibili a tutti gli utenti.

I veicoli elettrici sono a emissioni "zero" nella zona di funzionamento; per valutare però l'impatto complessivo sull'ambiente, è necessario verificare con quali sistemi è prodotta l'energia elettrica per la loro ricarica: se immaginiamo che una grande città utilizzi esclusivamente veicoli elettrici, l'impatto ambientale locale sarà praticamente zero ma, se l'energia elettrica fosse prodotta con centrali a carbone, l'impatto complessivo sarebbe molto pesante. Sono inoltre da considerare le problematiche del fine vita di questi veicoli, con particolare riferimento agli accumulatori. Per valutare in modo razionale il reale impatto che un veicolo causa, è necessario valutare ciò che accade durante tutto il ciclo di vita, ivi compreso il fine vita. La valutazione dell'impatto ambientale di un prodotto industriale si effettua attraverso una metodologia detta "Analisi del ciclo di vita" o "*Life Cycle Analysis*" (LCA). Questa metodologia prevede di considerare l'intero ciclo vita, includendo cioè la fase di "nascita" (estrazione dei materiali grezzi, loro trasformazione, fabbricazione e assemblaggio), alla vita utile vera e propria, e quella di "morte" che prevede la dismissione del prodotto, con il parziale recupero di materiali riutilizzabili. Con la LCA da una parte si tiene conto di tutte le parti rilevanti del ciclo di vita di un prodotto, dall'altra se ne evidenzia il percorso circolare, che nel caso di riciclaggio integrale potrebbe

teoricamente portare a un consumo di materie prime nullo. In tal modo ci si ispira ai processi naturali, per i quali il riciclaggio è integrale.



Figura 5 - Life Cycle Analysis

Occorre dire che, nel caso dei veicoli, la fase di vita utile è a sua volta molto complessa. Per confrontare ad esempio, a parità di condizioni, le emissioni di un veicolo a batteria con quelle di un veicolo tradizionale con motore a combustione interna, occorrerà partire dalla energia prelevata dall'ambiente per entrambi. In sostanza si fa un'analisi che è stata efficacemente denominata "*Well-to-Wheel*", letteralmente "dal pozzo alle ruote", di cui si tratterà più avanti.

Il drammatico tema dell'inquinamento, riguarda sia la presenza di sostanze nocive alla salute, sia l'emissione di anidride carbonica e, a tale proposito, è importante considerare due diverse tipologie di inquinamento:

- L'inquinamento locale si genera a causa dell'emissione di sostanze nocive da parte di apparecchiature che consumano prevalentemente carburanti fossili. Nel settore veicolare, per esempio, si tratta delle sostanze emesse dai tubi di scarico dei veicoli alimentati con carburanti tradizionali. Il problema è "localizzato" in quanto si manifesta esclusivamente dove avviene l'emissione, quindi principalmente nei centri città;

- L'inquinamento globale si riferisce alle emissioni di gas serra indipendentemente dal luogo in cui esse avvengono. Esso è causato sia dalle emissioni di apparecchiature funzionanti tramite combustione, sia dai gas emessi durante le fasi di produzione di vettori energetici come il petrolio o l'energia elettrica.

I gas responsabili dell'effetto serra vengono denominati “*Greenhouse Gases*” (abbreviati con GHG) e la loro quantità viene indicata come grammi di anidride carbonica equivalente. Ovvero, la quantità di ognuno dei gas serra prodotti, viene moltiplicata per un fattore che consente di trovare quanta anidride carbonica equivalente ne causerebbe il medesimo effetto. Il sistema dei trasporti incide per il 20% sui consumi di energia primaria e per il 17% sulle emissioni di CO₂ del pianeta, rappresentando assieme all'industria, ai consumi residenziali e di attività commerciali, uno dei principali settori con necessità di intervento. Per intervenire su queste problematiche, mai così attuali, già da diversi anni sono state avviate politiche di riduzione delle emissioni per veicoli tradizionali e campagne di sensibilizzazione all'acquisto di veicoli stradali elettrici ed ibridi. Infatti, la volontà di ridurre le emissioni della propulsione veicolare mediante una variazione dei vettori energetici, deve prendere in considerazione tutti i processi di produzione e consumo dell'intera filiera di produzione dei vettori energetici, e per questo è stata implementata un'approfondita analisi “*Well-to-Wheel*”.

L'analisi “*Well-to-Wheel*” indica un'analisi energetica comprendente tutti i processi, dalla produzione al consumo, che caratterizzano il ciclo di vita di un determinato vettore energetico: la terminologia fa riferimento all'uso di fonte fossile, sia per la produzione del combustibile di veicoli tradizionali, che per la produzione di energia elettrica poi convogliata nei veicoli elettrici. La metodologia è però valida anche nel caso di altre fonti primarie, quali ad esempio eolico e solare. L'analisi “*Well-to-Wheel*” si suddivide in due parti principali:

- Analisi “*Well-to-Tank*” (dal pozzo al serbatoio) identifica la fase di produzione e distribuzione del vettore energetico;
- Analisi “*Tank-to-Wheel*” (dal serbatoio alla ruota) identifica la fase di consumo del vettore energetico a bordo di un veicolo.

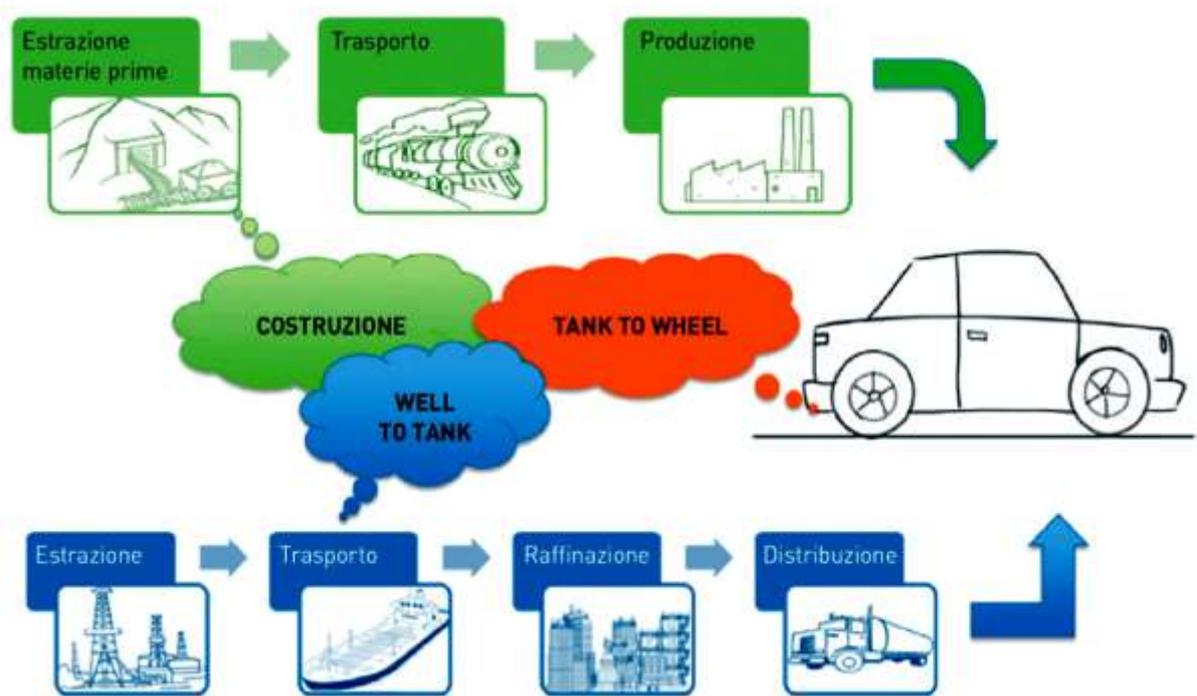


Figura 6 – Schematizzazione analisi “Well-to-Wheel”

Nei grandi centri urbani vengono emesse ogni giorno quantità molto elevate di sostanze nocive che generano problemi di salubrità degli ambienti ed aumentano il rischio di malattie. Per questo motivo alcune autorità locali emettono periodicamente mandati di limitazioni della circolazione nei centri cittadini. L'attuale parco di veicoli circolanti, sia in Italia che nel resto delle città europee, non consente di limitare drasticamente la quantità di emissioni locali in quanto la tecnologia propulsiva in assoluto più diffusa è il motore a combustione interna.

Il grafico mostra sia le emissioni di gas climalteranti durante l'utilizzo di un'auto, sia le emissioni “Well-to-Tank”. Per tutti i combustibili fossili, per i quali è stata considerata la percentuale di biocarburanti attualmente distribuita, il contributo della fase “Well-to-Tank” è rilevante e spazia dal 18% rispetto alla fase di utilizzo del veicolo per il diesel a circa il 25% per la benzina.

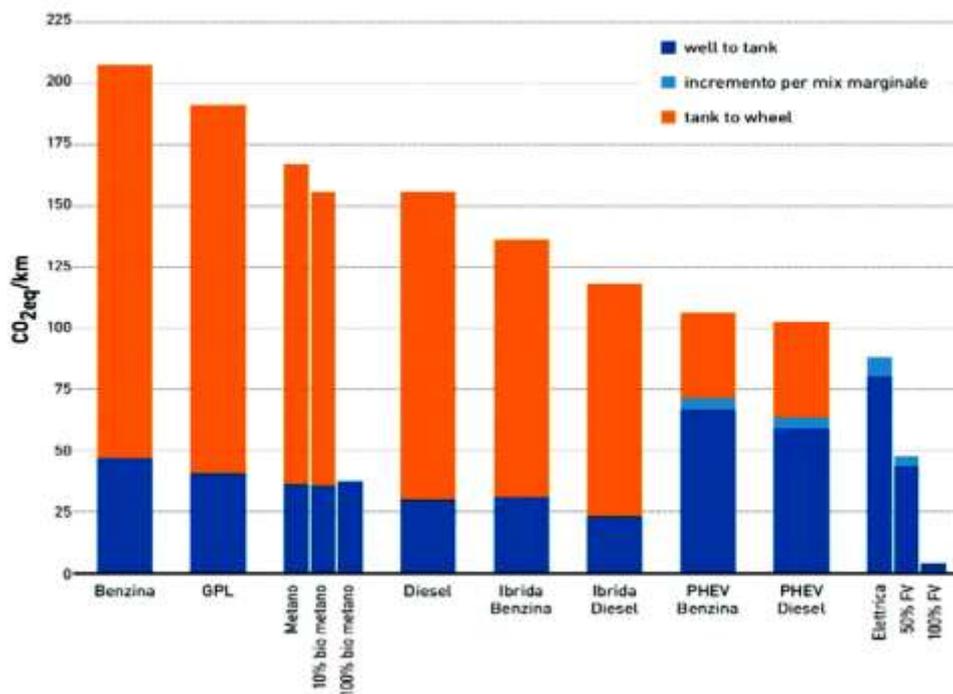


Figura 7 - Confronto tra tecnologie in termini di emissioni di gas a effetto serra

Se è vero che considerare anche la fase “*Well-to-Tank*” avvicina le prestazioni dei veicoli elettrici a quelle dei veicoli alimentati a fonti fossili, si nota comunque come i veicoli elettrici rimangano ben al di sotto delle emissioni delle tecnologie convenzionali. Per i veicoli elettrici, così come per gli ibridi plug-in, risulta fondamentale specificare il mix energetico utilizzato per la produzione dell’energia elettrica di ricarica.

Risulta evidente la necessità di intervenire radicalmente sulle abitudini energetiche anche nel settore industriale dei trasporti, per il quale si possono individuare due possibilità:

- Incremento dell’efficienza energetica dei veicoli circolanti;
- Introduzione di tecnologie e vettori energetici innovativi.

L’incremento di efficienza dei veicoli rappresenta una soluzione valida nel breve e medio termine, in quanto può risultare efficace per limitare inquinamento ed esaurimento delle scorte di fonti fossili durante il consolidamento di tecnologie innovative, come per esempio l’utilizzo di nuovi vettori energetici. Per incrementare l’efficienza energetica dei veicoli può rivelarsi interessante sviluppare sistemi di recupero dell’energia per veicoli tradizionali: si consideri, per esempio, che i veicoli con motore a combustione interna sono caratterizzati da grandi perdite energetiche come lo smaltimento di calore dalla

testata del motore, l'energia persa in frenata e l'energia contenuta nei fumi di scarico. Un'altra possibilità sfruttata nel medio periodo è la produzione di veicoli ibridi che consentono di sfruttare sia i vantaggi del motore a combustione interna sia il recupero di energia del motore elettrico. Inoltre la tecnologia ibrida consente di suddividere la richiesta energetica tra due diverse fonti di energia primaria. Le soluzioni di lungo periodo invece, richiedono una decarbonizzazione del settore dei trasporti, avviabile sostituendo ai carburanti tradizionali vettori energetici innovativi che consentano di contenere le emissioni di CO₂ e di preservare le scorte di fonti fossili. Per limitare a 2°C l'aumento di temperatura nel 2050, lo scenario 2DS della International Energy Agency indica che il contributo del settore dei trasporti nella riduzione delle emissioni di anidride carbonica dev'essere pari al 18%, come indicato in figura. Per garantire tale quota, entro il 2050 è necessario che i tre quarti dei veicoli privati e commerciali sia dotato di propulsione alternativa.

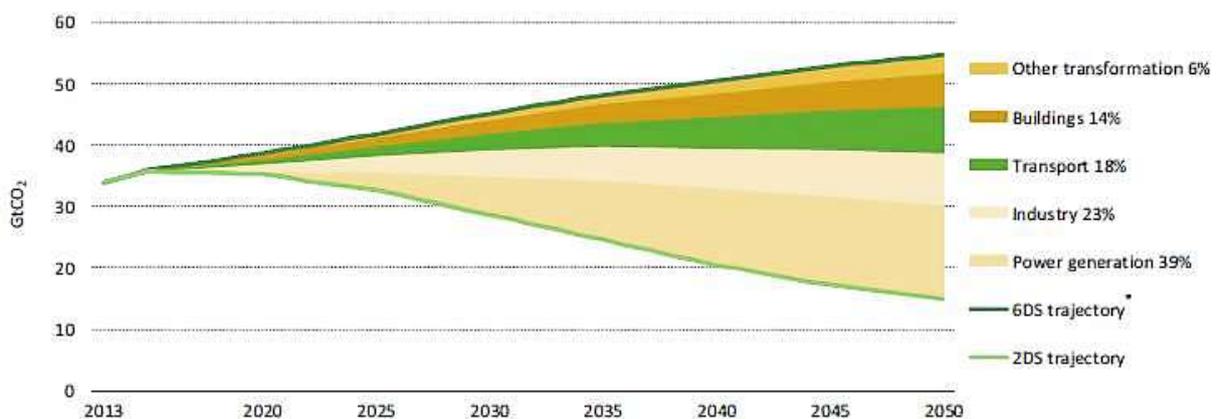


Figura 8 - Contributo alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica dei vari settori

Al giorno d'oggi gli unici veicoli alternativi ad aver riscosso un minimo successo commerciale sono i veicoli elettrici a batterie. Questi sono però caratterizzati da limiti che non ne consentono una rapida ed effettiva diffusione:

- Elevato prezzo di acquisto a causa del costo degli accumulatori agli ioni di Litio;
- Limiti di autonomia legati alla tecnologia dei sistemi di accumulo;
- Tempi di rifornimento eccessivi e non paragonabili ai veicoli tradizionali.

Una diffusione più rapida di veicoli elettrici e di tecnologie alternative per la mobilità richiede attualmente una forte evoluzione tecnologica che consenta loro di competere con i veicoli tradizionali in termini di autonomia, di tempi di ricarica e di prezzo all'acquisto. I prossimi anni sono da ritenersi fondamentali per uno sviluppo efficace della mobilità sostenibile, in modo che le vendite di veicoli elettrici sul mercato possano aumentare significativamente.

I veicoli con alimentazione puramente elettrica non hanno ancora riscosso un successo decisivo sul mercato, mentre le soluzioni ibride sono state in grado di coniugare i vantaggi della propulsione elettrica con i vantaggi di quella tradizionale, e ad oggi ricoprono un importante ruolo nel mercato veicolare. La soluzione a lungo termine rimane tuttavia quella elettrica, in quanto consente di slegare i sistemi di trasporto dal consumo di combustibili fossili, generando una serie di vantaggi intrinseci:

- Non vengono emessi gas di scarico nocivi per la salute e nemmeno emissioni di anidride carbonica che contribuirebbero al surriscaldamento globale;
- Le curve caratteristiche di coppia e potenza per un motore elettrico si adattano al meglio alla propulsione veicolare;
- Il rendimento del motore elettrico è sempre di gran lunga superiore a quello di un motore termico;
- Il motore elettrico è una macchina reversibile e può anche trasferire flussi di potenza dalle ruote alle batterie, in modo da ricaricare queste ultime ad esempio mediante la frenata rigenerativa (inoltre si riducono i livelli di particolato derivante dall'usura dei freni, ma non quelli derivanti dall'usura degli pneumatici).

Ma c'è un problema di fondo: la produzione di energia elettrica nei paesi europei richiede l'utilizzo di fonti fossili perciò la propulsione elettrica, nonostante consenta l'eliminazione di emissioni di CO₂ dai fumi di scarico, presenta un problema di emissioni nella filiera produttiva del vettore energetico. Infatti, la produzione di energia elettrica, a parte quella ottenuta da fonti rinnovabili, richiede l'utilizzo in larga scala di fonti fossili.

La tecnologia ibrida, come già detto precedentemente, è costosa ed ha un potenziale limitato, quindi in parallelo con questi sistemi sorge la necessità di ricercare e sviluppare

ulteriori ottimizzazioni lato veicolo e lato motore: tutti questi contributi assieme sono necessari per permettere il raggiungimento del target imposto.

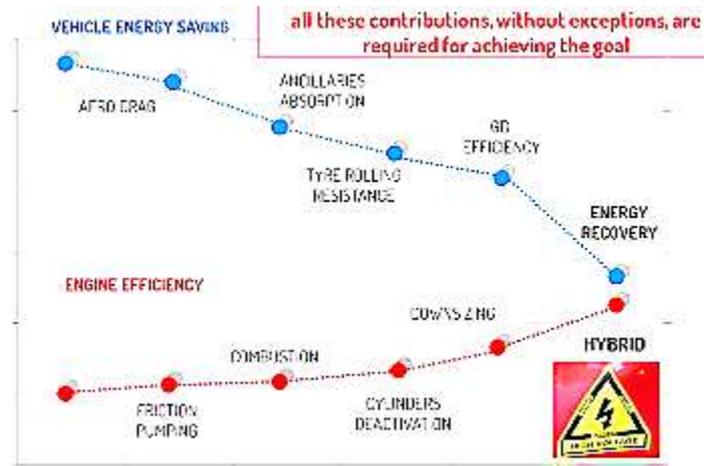


Figura 9 - Ottimizzazione efficienza

Le ottimizzazioni lato veicolo consistono principalmente in riduzione di peso, di resistenza aerodinamica e rotolamento, un minor assorbimento degli ausiliari, una maggiore efficienza della trasmissione ed infine un recupero energetico in fase di frenata o rilascio pedale. Le possibili ottimizzazioni lato motore invece riguardano una riduzione degli attriti, minori perdite per pompaggio, una combustione più efficiente, cylinders deactivation, downsizing ed infine l'utilizzo di un sistema di propulsione ibrido.

1.3. Sistemi di propulsione ibridi

I veicoli in cui coesistono due o più forme di accumulo di energia, al fine della generazione di energia meccanica, sono classificati come veicoli ibridi. Esistono vari tipi di ibridazione in base alla forma di accumulo di energia. I principali sono:

- HEV (Hybrid Electric Vehicle) → Ibrido elettrico: è la forma di ibridazione più comune dove l'energia viene accumulata in batterie ad alto voltaggio (oltre i 12V delle batterie standard) grazie all'ausilio di motori elettrici utilizzati come generatori durante il recupero;

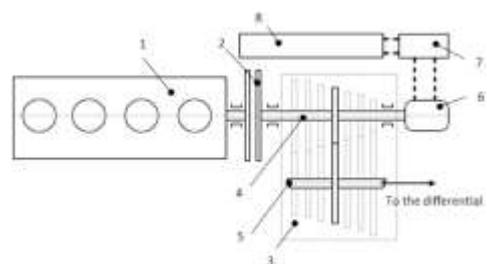


Figura 10 - Layout HEV

- HSF (High Speed Flywheel) → Ibrido meccanico (cinetico): l'energia di recupero viene immagazzinata mettendo in rotazione un volano tramite l'ausilio di una frizione che ne permette l'impegno durante il recupero per poi disimpegnare il volano (che continua a ruotare); viene poi chiusa la frizione per rilasciare l'energia al momento del bisogno;
- HHV (Hybrid Hydraulic Vehicle) → Ibrido idraulico: ci sono due serbatoi a bassa ed alta pressione collegati ad una pompa idraulica: la differenza di pressione tra i due serbatoi viene trasformata in potenza meccanica. In modalità rigenerativa la pompa aumenta la pressione all'interno del serbatoio per poi essere riutilizzata al momento del bisogno.

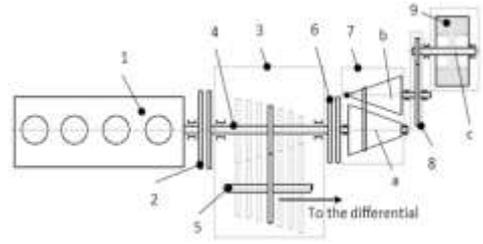


Figura 11 – Layout HSF

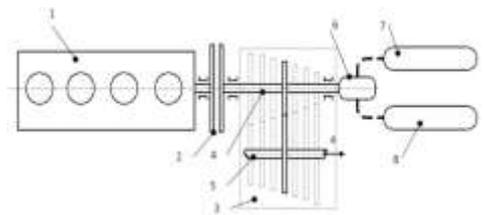


Figura 12 - Layout HHV

Una differenza importante tra i vari tipi di ibridazione è la percentuale di utilizzo della forma di energia utilizzata; consideriamo lo *state of charge* (abbreviato in SOC) variabile da 0%, energia accumulata nulla, a 100%, massima energia accumulata. A differenza dell'ibridazione elettrica gli altri tipi di ibridazione hanno la possibilità di utilizzare appieno l'energia accumulata; il range di SOC utilizzabile per i vari tipi è:

- HEV: $15\% \leq SOC \leq 95\%$
- HSF: $0\% \leq SOC \leq 100\%$
- HHV: $0\% \leq SOC \leq 100\%$

Questo è dovuto al fatto che la batteria dev'essere gestita nel migliore dei modi per non comprometterne la durata: è legato principalmente all'affidabilità e all'efficienza di utilizzo dell'energia elettrica accumulata; se si utilizzasse la batteria fuori dal range ottimale si avrebbero dei valori di resistenza interna molto alti, quindi si lavorerebbe ad efficienza molto ridotta.

Inoltre vi sono diversità anche sui limiti di potenza: mentre per l'HEV la potenza è limitata dal motore elettrico e dalle batterie, nell'HSF è limitata dalla potenza gestibile dalla trasmissione CVT e dalla frizione che ha la funzione di impegnare o meno il volano; nell'HHV i limiti di potenza sono determinati invece dalla caratteristica della pompa idraulica e dalla differenza di pressione disponibile. Tra questi tipi di propulsori ibridi quello che meglio si adatta all'implementazione su veicoli commerciali è il propulsore ibrido elettrico.

Un veicolo ibrido elettrico HEV è motorizzato da un motore a combustione interna (ICE) e una o più macchine elettriche che possono lavorare assieme o in maniera indipendente; si hanno due sistemi di accumulo di energia, un serbatoio di carburante per l'ICE e una batteria ad alto voltaggio (oltre alla batteria a basso voltaggio da 12V) per i motori elettrici. Un veicolo HEV quindi unisce i vantaggi sia del motore endotermico che del motore elettrico e permette di ottimizzarne l'utilizzo.

Ci sono diverse ragioni per cui utilizzare più di un sistema di propulsione:

- Downsizing: è uno dei principali vantaggi di un veicolo ibrido, ovvero la possibilità di adottare un motore a combustione interna di cilindrata ridotta e quindi aumentare l'efficienza di utilizzo e ridurre leggermente il peso e l'ingombro dell'ICE: gli svantaggi di un veicolo convenzionale con motore endotermico, come consumi elevati e inquinamento ambientale, sono causati dalla discrepanza tra le zone ad alta efficienza del motore con le zone di utilizzo reale: l'ICE viene utilizzato per la maggior parte del tempo in zone a basso carico e bassi regimi, la zona più inefficiente di un ICE;
- Frenata rigenerativa: l'energia di frenata è la più comune e prontamente disponibile che il veicolo può recuperare, invece che dissiparla in energia termica tramite i freni, per poi riutilizzarla in modo da ridurre i consumi. Ovviamente l'ICE non ha la possibilità di recuperare quest'energia quindi, per far sì di recuperarla, esistono sistemi (motori elettrici utilizzati come generatori) che permettono al flusso di potenza di viaggiare con direzione inversa, dalle ruote alle batterie; un veicolo convenzionale invece ha un flusso di potenza che può andare solo in una direzione: dall'ICE alle ruote e non viceversa;

- La potenza di trazione può essere fornita sia dall'ICE che dal motore elettrico, o da una combinazione di questi. Questa flessibilità può essere esplorata per combinare la richiesta di potenza del powertrain con la strategia più efficiente: si può spostare il punto motore, grazie all'aggiunta di un ulteriore grado di libertà (coppia del motore elettrico), in una zona del piano quotato più efficiente (BSFC minore);
- L'efficienza della macchina elettrica è nettamente più alta rispetto all'efficienza del motore endotermico; inoltre i motori elettrici hanno una caratteristica di coppia tale per cui a bassi regimi possono attuare una coppia elevata, mentre a regimi elevati la coppia diminuisce progressivamente (una volta raggiunta la potenza massima questa rimane costante e aumentando il regime cala la coppia);
- Si possono adottare ausiliari elettrificati per consentire di eliminare coppie resistenti dovute ad ausiliari come ad esempio la pompa dell'acqua, ecc.

Nonostante questi vantaggi l'ibridazione introduce alcune problematiche importanti:

- Maggiori costi dovuti a componenti elettrici come batterie, macchine elettriche, dispositivi di controllo (inverter), cavi elettrici ed altri componenti per il sistema elettrico;
- Maggior peso e packaging rispetto ai veicoli convenzionali dovuto al sistema di propulsione elettrico;
- Maggior spazio necessario e da ottimizzare;
- Minor affidabilità dovuta ai componenti aggiuntivi necessari e alla complessità del sistema che introduce potenziali guasti (come l'invecchiamento della batteria);
- Maggior complessità del sistema di controllo e quindi maggior complessità di ottimizzazione dell'efficienza, guidabilità, consumi ed emissioni.

Queste complessità aggiuntive causate dal fatto di avere più sorgenti di potenza, e quindi date dalle innumerevoli possibilità di controllo e strategie, rende importante l'utilizzo di uno strumento di simulazione rapida per poter attuare un'analisi di sensibilità in fase di calibrazione e di ottimizzazione della strategia.

Inoltre, anche a seconda del grado di ibridazione (potenza sistema di propulsione elettrico rispetto alla potenza totale installata) e della capacità del sistema di propulsione ibrido di immagazzinare energia elettrica, si definiscono i seguenti livelli di ibridazione:

- *Micro hybrid* (micro ibridazione): sono veicoli molto simili a quelli tradizionali ma, a differenza di questi ultimi, possiedono la funzionalità di “Start&Stop” che consente di spegnere e riaccendere il veicolo durante le brevi soste ai semafori ed agli stop. Per questo scopo sono dotati di una batteria con maggiore capacità energetica rispetto a quelli tradizionali;
- *Mild hybrid* (ibridazione leggera): non solo può fare S&S ma può anche recuperare una parte dell’energia cinetica in frenata, però la modalità di funzionamento puramente elettrico non permette di seguire per intero un ciclo di guida normalizzato;
- *Full hybrid* (ibridazione piena): il sistema elettrico da solo è in grado di far avanzare il veicolo su un ciclo di guida normalizzato, ma non c’è la possibilità di ricaricare il veicolo esternamente. Sono quindi caratterizzati da una batteria con capacità di accumulo molto maggiore rispetto ai precedenti, la quale consente percorrenze in modalità elettrica superiori;
- *Plug-in hybrid*: i veicoli ibridi che hanno una presa di ricarica consentono la ricarica delle batterie da una presa di corrente della rete domestica; questi permettono di aggirare uno dei limiti delle auto *full hybrid*, la cui batteria viene caricata esclusivamente con il recupero di energia in rilascio, in frenata e rigenerata tramite ICE;
- EV (electric vehicle): sono veicoli puramente elettrici e non sono dotati di un motore endotermico per la ricarica delle batterie, l’unica fonte di energia proviene da una fonte esterna.

In base al livello di ibridazione si ottengono benefici sul consumo come viene illustrato nella seguente immagine: maggiore è il livello di ibridazione e maggiori sono i benefici ottenibili.

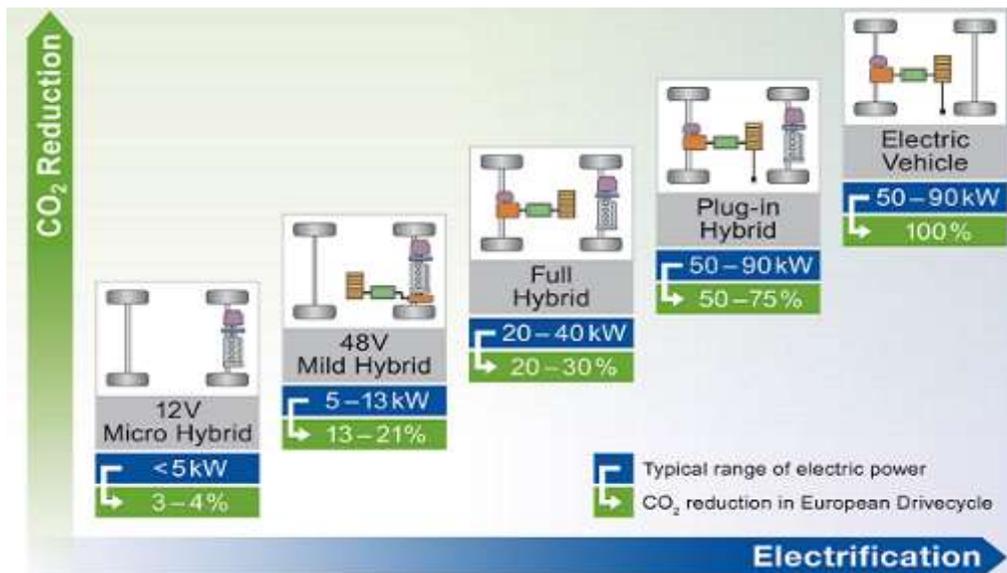


Figura 13 - Potenze e riduzione di CO₂ per differenti livelli di ibridazione

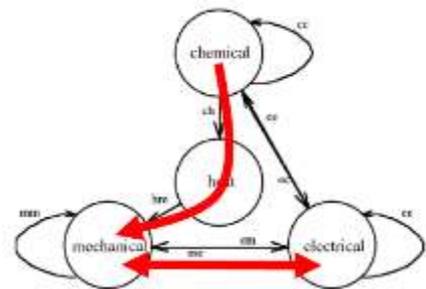
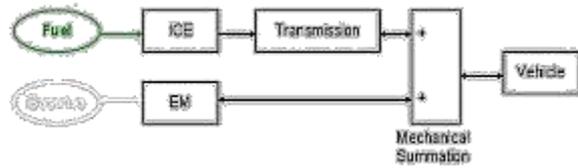
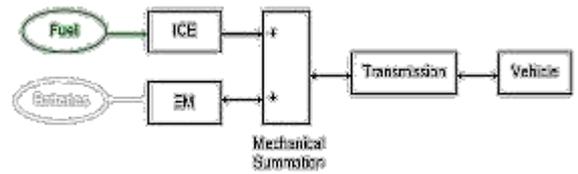
Inoltre, dipendentemente dal livello di ibridazione, sono disponibili diverse funzioni: maggiore il livello di ibridazione e maggiori saranno le funzioni disponibili dal sistema ibrido.

Tabella 2 - Funzioni disponibili dei vari sistemi ibridi

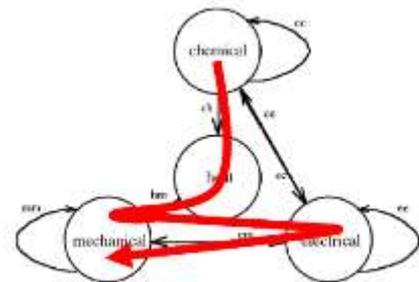
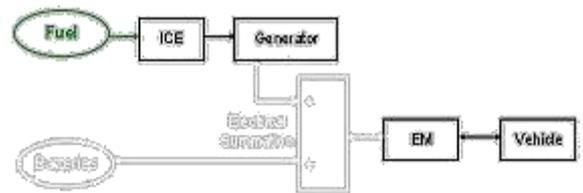
System	Function				
	Stop&start	Electric traction	Regenerative braking	Electric driving only	External battery charge
Conventional vehicle	Possible	No	No	No	No
Micro HEV	Yes	No	Minimum	No	No
Mild HEV/ Medium HEV	Yes	Limited	Yes	Minimum	No
Full HEV	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Plug-in HEV (PHEV)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Extended range EV (EREV)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Battery electric vehicle (BEV)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Fuel cell electric vehicle (FCEV)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes (electric and/or hydrogen refuelling)

Anche in funzione della topologia di un veicolo ibrido vengono definite diverse classi di layout, definite dalla posizione e dall'utilizzo dei sistemi di propulsione, il cui flusso di energia è dipendente dalla configurazione del sistema di propulsione ibrido. Le possibili configurazioni vengono di seguito descritte:

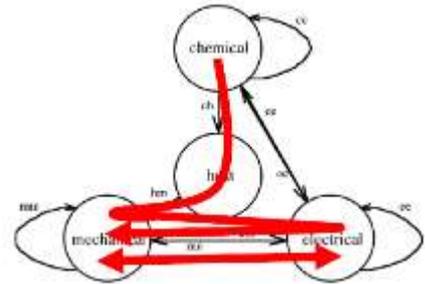
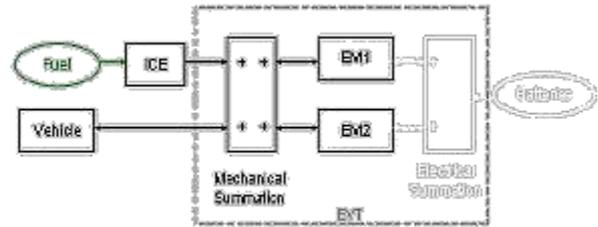
- Parallel hybrid (pre e post transmission):* in questo tipo di configurazione si possono utilizzare entrambi i propulsori contemporaneamente sommando, tramite una connessione meccanica, le coppie propulsive attuate da entrambi i motori. Si può inoltre procedere solamente con il motore endotermico o esclusivamente con il motore elettrico. L'ICE può essere utilizzato alla sua massima efficienza solo in certe condizioni (diversamente dall'architettura Series). Esistono due possibili architetture del parallel hybrid, una con la trasmissione posizionata dopo la somma meccanica delle coppie e l'altra dove la somma delle coppie viene fatta dopo la trasmissione: in generale è più conveniente l'architettura parallela con la somma dopo la trasmissione per non passare dall'efficienza del cambio anche durante la guida puramente elettrica;



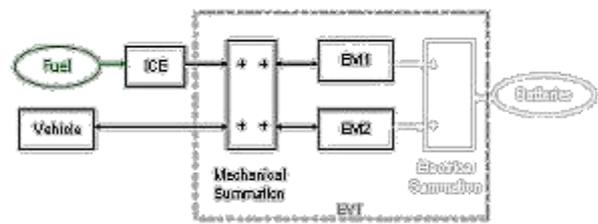
- Series hybrid:* in questo tipo di layout il motore endotermico è utilizzato esclusivamente da generatore; per l'avanzamento del veicolo viene invece utilizzato solo il motore elettrico. Quindi il motore a combustione interna viene utilizzato nel punto di massima efficienza, punto motore a minore consumo specifico, esclusivamente per ricaricare le batterie: non vi è quindi nessuna connessione meccanica tra il motore endotermico e le ruote;



- *Power-split hybrid*: in questo tipo di layout il motore può essere utilizzato sia per l'avanzamento sia per ricaricare le batterie: è una configurazione mista che combina i vantaggi sia del parallel che del series. Il sistema utilizza la potenza dell'ICE in parte per ricaricare le batterie e in parte per far avanzare il veicolo: si cerca di minimizzare l'utilizzo del sistema come se fosse un'architettura series data la minor efficienza del sistema rispetto al parallel. La caratteristica di questa architettura è il fatto di avere i motori disaccoppiati tra loro: questo introduce un grado di libertà aggiuntivo al controllo (ulteriore complessità);



- *Series-parallel hybrid*: molto simile alla configurazione power-split con la differenza che, tramite l'ausilio di frizioni, c'è la possibilità di disaccoppiare il motore endotermico dal motore elettrico, diventando un parallel hybrid, o dalle ruote, diventando un series hybrid: è un sistema più flessibile rispetto al power-split.



Di seguito viene illustrata la classificazione dei veicoli ibridi elettrici in funzione delle possibili topologie di ibridazione. Si evidenzia una potenza elettrica sempre più crescente all'aumentare del livello di ibridizzazione. Nell'immagine vengono mostrati anche sistemi "fuel cell" ibridi: questa tecnologia prevede invece di utilizzare l'idrogeno per generare energia elettrica direttamente a bordo; un po' come accade alle elettriche "Range Extended" che fanno la stessa cosa con un motore a combustione interna. La differenza è che l'idrogeno, in questo processo di conversione, non produce sostanze inquinanti. Nelle fuel cell infatti l'idrogeno contenuto in uno o più serbatoi viene fatto passare in delle specifiche celle e combinato con l'aria. Questo processo genera energia elettrica e calore, dando come unica sostanza "di scarto" del semplice vapore acqueo.

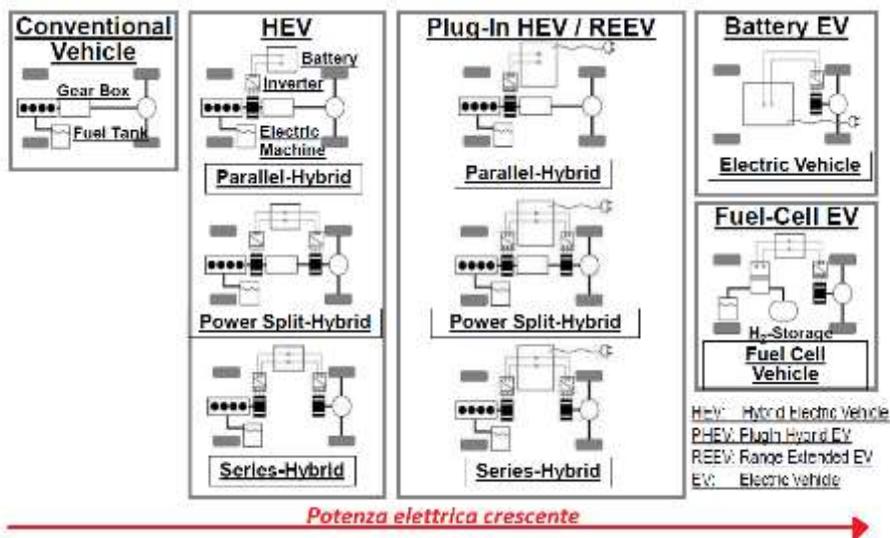


Figura 14 - Classificazione veicoli ibridi

Un'altra classificazione viene fatta per i motori elettrici in base alla loro posizione sulla catena di potenza: le possibili posizioni vanno da P0 a P5 secondo la seguente figura.

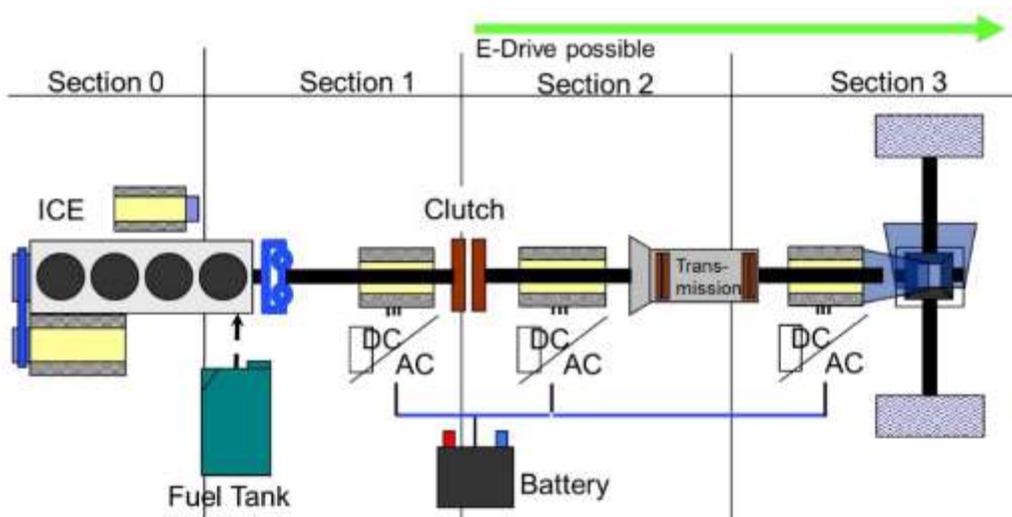


Figura 15 - Nomenclatura in funzione della posizione del motore elettrico

Non viene riportata la posizione del motore elettrico sugli assali, che corrisponde alla posizione P4, e la posizione P5 che indica il posizionamento del motore elettrico direttamente sulle ruote.

In base alla posizione del motore elettrico vengono definite diverse funzioni; più si va verso le ruote e più funzioni sono disponibili dal motore elettrico.

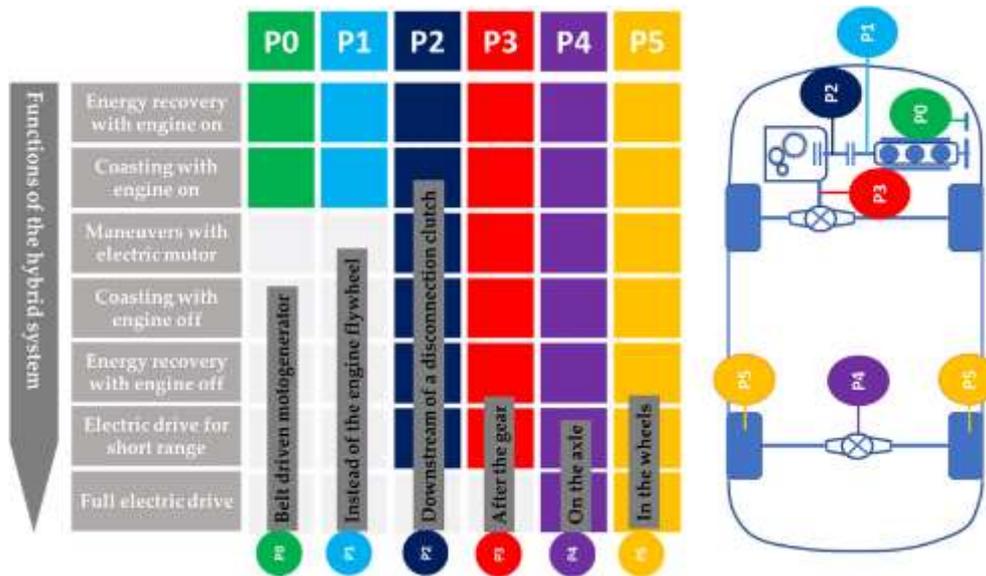
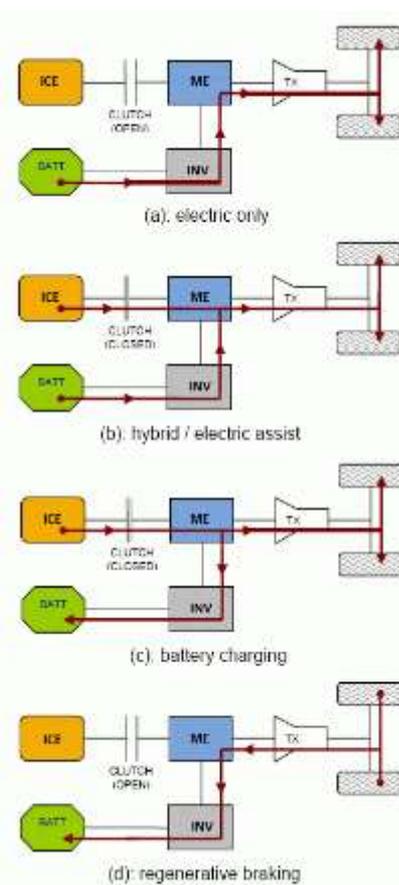


Figura 16 - Funzioni del sistema ibrido in funzione della posizione del motore elettrico

Prendendo ad esempio un'architettura parallel hybrid con ME P2 possiamo andare a valutare le possibili modalità di utilizzo del powertrain ibrido e la direzione del flusso di potenza per ognuna di queste; principalmente viene utilizzato in quattro modalità:

- Modalità eDrive:* in modalità puramente elettrica la frizione è aperta ed il flusso di potenza parte dalla batteria HV, passa per l'inverter per poi finire nel motore elettrico che converte l'energia elettrica in energia meccanica la quale viene trasferita alle ruote;
- Modalità hybrid:* in modalità ibrida vengono utilizzati entrambi i propulsori per l'avanzamento ed il motore elettrico viene quindi utilizzato per assistere l'ICE. I flussi di potenza dall'ICE e dal motore elettrico vengono sommati meccanicamente e poi trasferito alle ruote;
- Modalità ricarica:* durante la fase di ricarica il flusso di potenza proveniente dall'ICE viene diviso tra il motore elettrico, che viene utilizzato come generatore, e le ruote;



- d. *Modalità frenata rigenerativa*: il flusso di potenza passa dalle ruote al motore elettrico che viene utilizzato da generatore e quindi oppone coppia resistente frenando il veicolo.

Parallelamente allo sviluppo tecnologico dei veicoli ibridi nasce l'esigenza di determinare una procedura che coordini l'iterazione tra i diversi propulsori. La gestione dei flussi di energia fra i vari convertitori e accumulatori, per rispondere a una data richiesta di coppia da parte del conducente, è compito del controllore di supervisione, o "*Supervisory Powertrain Controller*". Tale controllore, tipico dei veicoli ibridi, si colloca rispetto a una struttura di controllo in coppia tradizionale in posizione intermedia tra gli algoritmi di interpretazione della volontà del conducente (trasformazione della posizione dei pedali di accelerazione e freno in richiesta di coppia) e quelli di controllo dei singoli componenti quali motori, trasmissione e freni: al livello più basso, quindi, agiscono dei controllori ECU (*Electronic Control Unit*) responsabili del controllo di ogni singolo dispositivo elettronico trasformando le istruzioni provenienti dal controllore di supervisione in segnali di controllo.

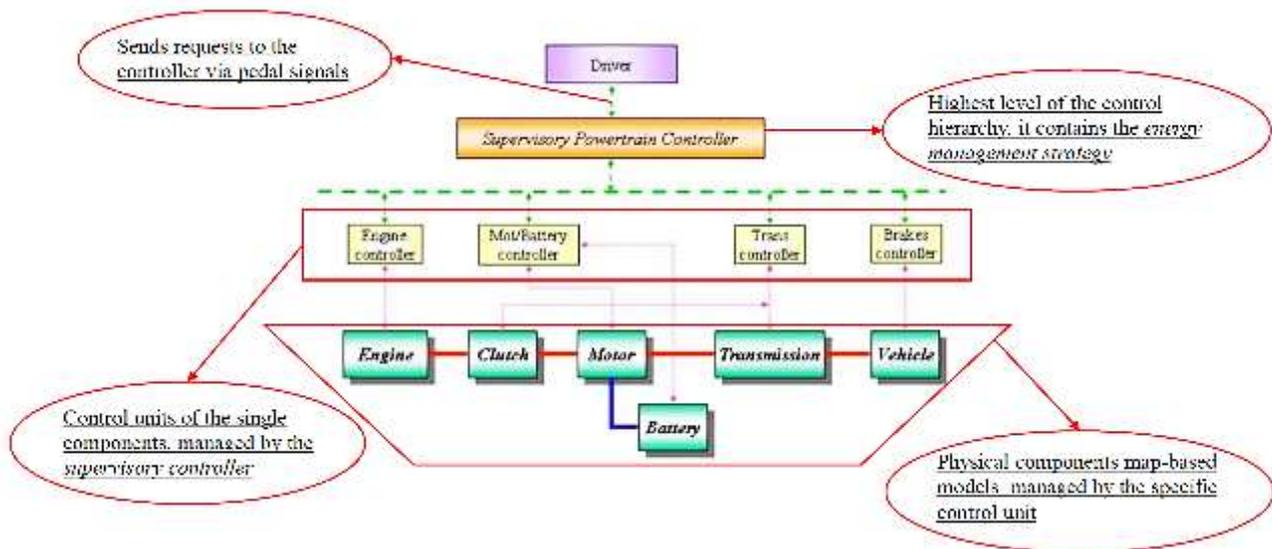


Figura 17 - Gerarchia di controllo di un veicolo ibrido

Gli algoritmi di gestione dell'energia sono ispirati a dei criteri di minimizzazione del consumo energetico globale (combustibile ed energia elettrica) vincolata al rispetto di un'evoluzione mediamente costante dello stato di carica delle batterie, oltreché dei limiti fisici dei componenti e dei vincoli dettati dalle esigenze di guidabilità. Gli algoritmi di

gestione dell'energia appartengono a due categorie distinte, con possibilità di approcci misti:

- Strategie euristiche: basate sulla traduzione di specifiche a vari livelli e su regole empiriche dettate dall'esperienza;
- Strategie ottimizzate: basate sull'applicazione di algoritmi matematici di controllo ottimo.

Vi è però un problema dettato dal fatto che per poter applicare una strategia ottimizzata è necessario conoscere il futuro, quindi non è possibile l'implementazione in real-time. Possiamo immaginare che il veicolo oggetto di studio sia dotato di un dispositivo di navigazione, ad esempio un GPS, tramite il quale sia possibile ricavare informazioni sull'itinerario che andremo a percorrere. L'ideale sarebbe avere tutte le informazioni che caratterizzano la scelta ottima: limiti di velocità, topografia del territorio, caratteristiche del manto stradale, situazione del traffico; allora un'unità di controllo sarebbe in grado di elaborare un piano energetico ottimale. In particolare queste informazioni molto dettagliate sui prossimi passi del veicolo potranno consentire di effettuare scelte particolari che riusciranno a migliorare sensibilmente l'economia dell'energia nell'auto. Possiamo infatti pensare a un impiego ottimo del motore termico che saremo in grado di far funzionare per lunghi periodi all'efficienza massima, senza dovergli richiedere picchi di potenza perché eventuali richieste di questo tipo possono essere soddisfatte dalla macchina elettrica: dovremo fare in modo che il motore termico si trovi ad ogni istante in punti di funzionamento che minimizzino i consumi; nel fare questo dobbiamo in ogni caso garantire che la combinazione delle due potenze soddisfi le richieste del guidatore. La strategia si basa allora nell'ottimizzare, istante per istante, l'efficienza termodinamica istantanea del motore termico utilizzando gli accumulatori come "serbatoio" di energia in grado di immagazzinare energia se la potenza è in eccesso, o di fornire energia se la potenza è in difetto.

Le strategie ottimizzate non sono direttamente utilizzabili per applicazioni in tempo reale: si passa quindi a strategie sub-ottime che possono garantire un'ottimizzazione locale, ma non globale. La seguente figura mostra le possibili strategie di ottimizzazione e le rispettive caratteristiche.

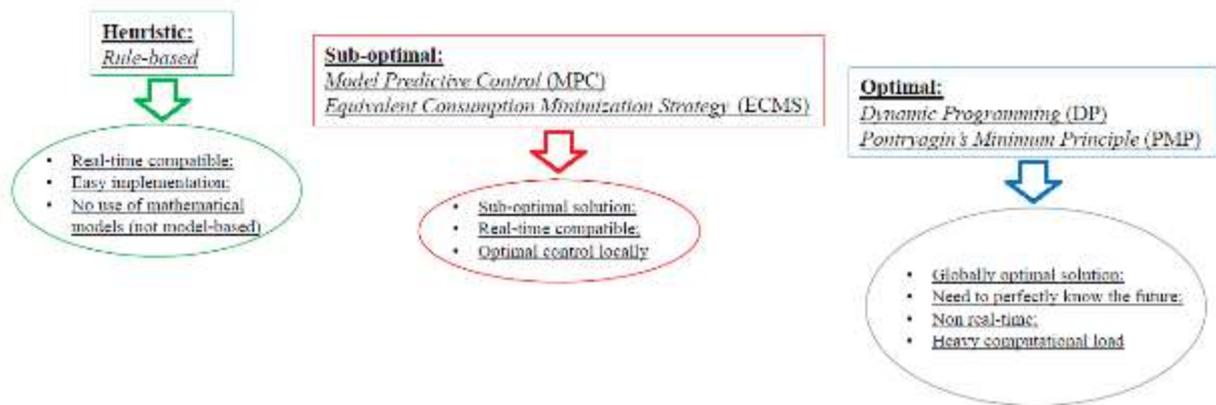


Figura 18 - Strategie di controllo

Il sistema che controlla la gestione dell'energia, anche chiamato “*Energy Management System*” (EMS), deve poter agire in real-time: quindi le possibili strategie applicabili sono quelle euristiche e sub-ottime, quali ad esempio “*Rule-based*” ed “*Equivalent Consumption Minimization Strategy*” (ECMS). La prima si basa sulla gestione del powertrain tramite la definizione di regole che definiscono quando e come utilizzare i motori elettrici rispetto all'ICE e, ad esempio, come gestire lo split di coppia tra ICE e motore elettrico; la ECMS invece si basa sulla minimizzazione, istante per istante, di una funzione di costo globale, basata su vincoli fisici dei vari componenti (ad esempio per evitare l'utilizzo della batteria al di fuori del range ottimale viene definita una funzione di costo tale per cui se lo stato di carica va oltre il limite massimo impostato si predilige la scarica della batteria piuttosto che caricarla ulteriormente, e viceversa). Sulla base del modello è dunque possibile cercare di costruire una funzione matematica che al meglio rappresenti le grandezze del consumo e del funzionamento dell'auto. Questa funzione viene denominata funzionale di costo e, tramite le conoscenze matematiche, possiamo andare a ricercare il minimo di questa funzione.

I principali obiettivi che ci si prefigge durante il processo di ottimizzazione della strategia di controllo sono principalmente due:

- Minimizzazione del consumo di combustibile e delle emissioni;
- Valutazione guidabilità.

Quindi durante il processo di ottimizzazione della strategia si dovranno tenere in considerazione questi due obiettivi principali per far sì di ottenere le prestazioni che

garantiscono il soddisfacimento delle specifiche iniziali imposte e che siano commercialmente più favorevoli.

La strategia di controllo implementata in vettura è una strategia basata su regole (*Rule-Based Energy Management Strategy*) che definiscono quando e come utilizzare i propulsori in base a diversi parametri di controllo: tra i più importanti ci sono ad esempio lo stato di carica, le soglie di velocità vettura di ingresso e uscita da eDrive, la coppia LPM ed altri di cui si parlerà nei prossimi capitoli. Le strategie di controllo basate su regole sono strutturate sulla base di semplici relazioni e risultano particolarmente efficaci nella gestione del veicolo in tempo reale dal momento che non necessitano di alcuna conoscenza preventiva di dati del profilo di guida. Questo tipo di controllo in realtà, sebbene sembri molto grossolano, si rivela essere molto efficiente quando si hanno poche informazioni a priori sul ciclo di guida da seguire e, nonostante tutto, sono quelle più utilizzate nei modelli presenti sul mercato.

1.4. Architettura VF1

L'architettura del powertrain ibrido della VF1 è costituita da un motore a combustione interna V8 turbocompresso posizionato posteriormente e tre motori elettrici, due dei quali sono montati sull'assale anteriore, ME P4, e l'altro tra ICE e cambio prima della frizione, ME P1: è quindi un'architettura parallel hybrid pre-transmission con l'aggiunta dei motori elettrici sull'assale frontale. Inoltre la vettura è equipaggiata con un cambio DCT ad 8 marce, una batteria ad alto voltaggio (HVB) adibita al recupero e al rilascio dell'energia per i motori elettrici, una batteria a basso voltaggio (LVB) la quale è utilizzata per gli ausiliari, un convertitore DC/DC per il trasferimento di energia tra una batteria e l'altra ed infine un inverter per ogni macchina elettrica che ne permette il controllo. Tra i ME P4 e le ruote sono presenti due elementi di sincronizzazione delle macchine elettriche, i “dog ring”, che, una volta innestati, abilitano la coppia all'asse anteriore: la coppia erogata dalle ME P4 viene trasmessa a terra solo se i dog ring sono innestati e quindi se i motori elettrici sono connessi alle ruote. Il dog ring è un attuatore che può muoversi in modo da ingaggiarsi o sganciarsi solo dopo aver ricevuto tale comando da un altro nodo master.

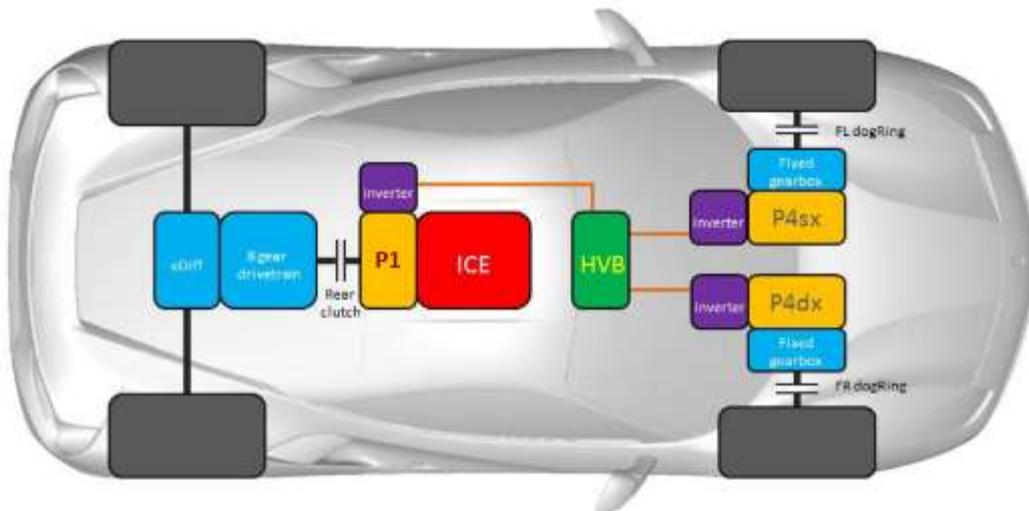


Figura 19 - Architettura VF1

I motori elettrici ME P4 sugli assali anteriori sono utilizzati quasi esclusivamente durante la guida eDrive e in frenata rigenerativa mentre il motore elettrico ME P1 viene utilizzato per fornire/assorbire coppia in quattro condizioni diverse:

- *Fill-up*: coppia aggiuntiva per colmare ad esempio il turbo-lag;
- *Overboost*: coppia aggiuntiva alla coppia massima stazionaria;
- *Overbraking*: freno motore aggiuntivo;
- *Load Point Movement (LPM)*: coppia ICE aggiunta alla richiesta di coppia al pedale per ricaricare le batterie.

Inoltre i motori P4 montati sull'assale anteriore devono essere capaci di erogare coppia diversa per le due ruote nelle condizioni in cui viene richiesto, come avviene ad esempio durante una curva: si tratta dunque del *"torque vectoring"*.

Di seguito la nomenclatura per le parti principali:

- ICE: Internal Combustion Engine
- ME P1: macchina elettrica posteriore in posizione P1 (prima della frizione)
- ME P4: macchine elettriche anteriori in posizione P4 (sugli assali)
- HVB: High Voltage Battery
- LVB: Low Voltage Battery

1.5. Architettura VF2

L'architettura della VF2 è differente rispetto alla VF1: vi è solamente un motore elettrico in posizione P2, collocato dopo la frizione e prima della trasmissione. Questa vettura presenta quindi un'architettura parallel hybrid pre-transmission: durante la guida puramente elettrica viene aperta la frizione in modo da non trascinare il motore e tutti gli attriti ad esso associati.

Quindi su VF2 il flusso di potenza passa anche dalla trasmissione durante la guida puramente elettrica, rendendo meno efficiente la guida eDrive rispetto al veicolo VF1. Inoltre il motore elettrico utilizzato in posizione P2 ha un'efficienza mediamente più bassa del motore elettrico P4: questo è dovuto dal regime e dalla coppia attuabile che sono strettamente dipendenti dalla posizione.

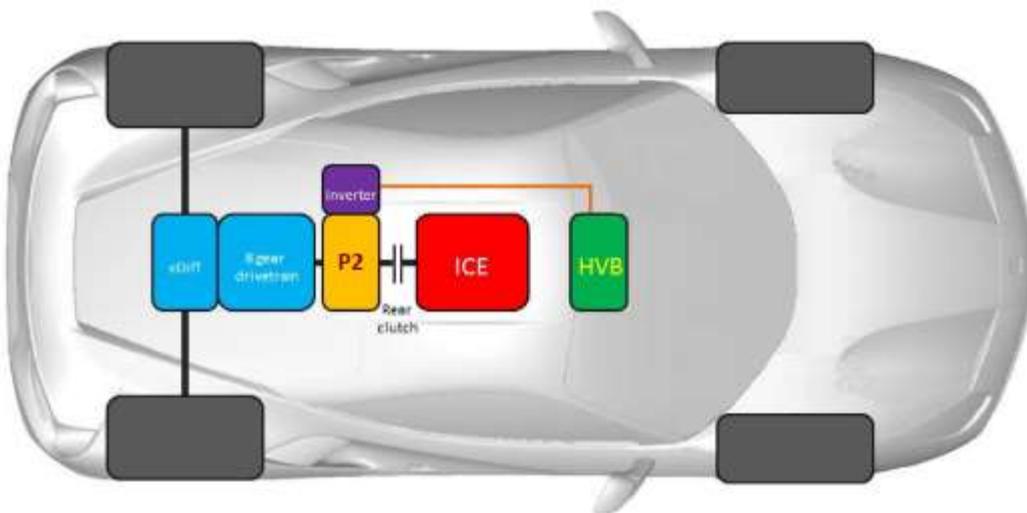


Figura 20 - Architettura VF2

1.6. Differenze tra le due architetture

Le principali differenze tra le due architetture sono la mancanza dei motori elettrici P4 sugli assali frontali e la diversa posizione del motore elettrico rispetto alla frizione. Quindi, se su VF1 vengono utilizzati i P4 per la guida eDrive, su VF2 si utilizza il P2 durante la guida puramente elettrica ed il flusso di potenza passa anche dalla trasmissione: questo implica

una catena di efficienza più sfavorevole e margini di miglioramento molto più ridotti rispetto alla VF1.

Basti pensare all'energia recuperata tramite coppia LPM: questa viene utilizzata in modo differente dalle due vetture: la VF1 utilizza questa energia accumulata in batteria principalmente per alimentare i motori elettrici P4 durante la guida eDrive, mentre la VF2 riutilizza questa energia tramite il P2 (lo stesso motore elettrico che l'ha generata): questo implica che sia durante il recupero tramite frenata rigenerativa che durante l'utilizzo il flusso di energia passa attraverso una catena meno efficiente per VF2 e anche questo determina minori benefici ottenibili.

Inoltre anche le motorizzazioni sono diverse: mentre la VF1 monta un motore a combustione interna V8, la VF2 è equipaggiata con un motore V6; questo implica che non si potranno ottenere gli stessi benefici utilizzando la medesima strategia sia per uno che per l'altro. L'ottimizzazione delle due vetture dev'essere quindi calibrata singolarmente per ogni modello e non è possibile trovare un'ottimizzazione globale data la differente architettura, oltre che un diverso motore a combustione interna.

2. Modello Simulink

Con il termine modellizzazione si intende quel processo cognitivo che porta alla costruzione di un modello, ovvero di una rappresentazione teorica contenente gli elementi essenziali atti a descrivere in modo compiuto componenti e comportamenti di sistemi fisici reali. La modellizzazione permette quindi di selezionare particolari aspetti di un componente o di fenomeno fisico e di rappresentarli mediante relazioni di tipo matematico validate da osservazioni e sperimentazioni.

La modellazione permette di creare una rappresentazione virtuale di un sistema reale che include componenti software e hardware. Se i componenti del modello sono guidati da relazioni matematiche, è possibile simulare questa rappresentazione virtuale attraverso un'ampia gamma di condizioni per valutarne il comportamento. La modellazione e la simulazione sono particolarmente utili per le condizioni di test che potrebbero essere difficili da riprodurre unicamente tramite prototipi hardware, soprattutto nella fase iniziale del processo di progettazione quando l'hardware potrebbe non essere ancora disponibile. L'iterazione tra modellazione e simulazione può migliorare la qualità del sistema nelle prime fasi del design, riducendo in tal modo il numero di errori riscontrabili nel processo di progettazione. In questa fase è fondamentale comprendere le interazioni tra i vari sottosistemi. L'integrazione di batterie, motori elettrici, inverter e generatori con tutti gli altri sottosistemi del veicolo nelle fasi iniziali del ciclo di progettazione consente di avere un quadro dettagliato della distribuzione di energia globale per il bilanciamento ottimizzato delle caratteristiche.

Per la modellazione della vettura è stato utilizzato un modello Simulink: questo software è un ambiente di programmazione a blocchi che permette di modellare, simulare e analizzare sistemi dinamici come quelli di controllo. Uno svantaggio dei sistemi ibridi, come già anticipato, è la maggior complessità del sistema e quindi del controllo: si rende necessario l'utilizzo di strumenti di simulazione per una loro attenta ed efficace progettazione e per lo sviluppo delle logiche di gestione. Per i veicoli ibridi la simulazione è necessaria per sviluppare e testare diverse strategie di controllo, predire il consumo di

combustibile, le performance e le condizioni di immagazzinamento dell'energia elettrica, quindi lo stato di carica della batteria.

Per descrivere il comportamento della vettura su una data traccia di velocità si possono utilizzare principalmente due diversi approcci:

- *Backward* (simulazione quasi-statica): la velocità vettura è l'input mentre coppie, forze e potenze sono l'output. È un modello molto veloce (tempi di calcolo ridotti) ed accurato ma poco dinamico e meno flessibile;
- *Forward* (simulazione dinamica): vengono date in input le forze resistenti e in output si hanno velocità ed accelerazione vettura. Il modello è dinamico e dettagliato, più flessibile e più realistico ma rende la simulazione più lenta.

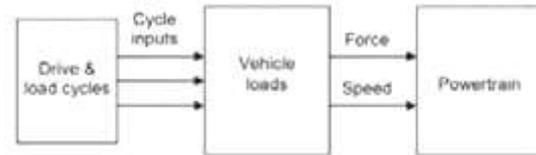


Figura 21 - Modello backward

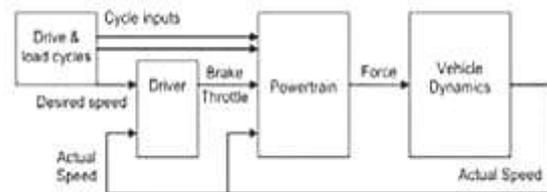


Figura 22 - Modello forward

Il modello Simulink utilizzato è un modello map-based di tipo forward dove, data in ingresso la traccia di velocità (in questo caso del ciclo omologativo WLTC), il modello del driver, grazie ad un controllo PID in retroazione, riesce a seguire la traccia tramite l'attuazione dei pedali di accelerazione e freno: questi poi vengono dati in input per simulare la dinamica di tutti i componenti che compongono la vettura. Quindi, tramite la differenza di velocità tra quella desiderata e quella in output dal modello della vettura, si corregge il controllo del driver per far sì di seguire la traccia il più fedelmente possibile.

All'interno del modello Simulink della vettura si ritrovano 14 blocchi principali tra i quali ci sono:

- Driver → modello del guidatore;
- Vehicle → modello del veicolo;
- Gearbox → modello della trasmissione;

- ICE → modello del motore endotermico;
- Catalyst → modello del catalizzatore;
- Motronic simplified → modello della ECU semplificato;
- HV battery → modello della batteria ad alto voltaggio;
- LV battery → modello della batteria a basso voltaggio;
- P4 right → modello del motore elettrico P4 destro;
- P4 left → modello del motore elettrico P4 sinistro;
- P1 → modello del motore elettrico P1;
- DC/DC → modello del convertitore DC/DC;
- EEM → modello che contiene le leggi di Kirchhoff;
- Electrical loads → modello dei carichi elettrici (ausiliari).

All'interno di questi blocchi principali vi sono quindi altri modelli che servono a descrivere le dinamiche di ogni parte della vettura. Collegando tra di loro tutti i blocchi si ha un modello completo della vettura con il quale è possibile simulare il comportamento dinamico di quest'ultima durante un ciclo di omologazione WLTC (o qualsiasi altro ciclo si voglia simulare). Grazie a queste simulazioni si può così analizzare il comportamento della vettura al variare delle calibrazioni e per le diverse strategie.

2.1. Analisi di sensibilità

Un'analisi di sensibilità consiste nel valutare gli effetti sui risultati forniti da un modello, ossia dalle funzioni che lo descrivono analiticamente, indotti da modifiche nei valori delle variabili di ingresso; questa può fornire informazioni di rilevante interesse in una prima fase di ottimizzazione di un modello. In sistemi multi-variabile MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) come quello analizzato, risulta particolarmente difficile poter definire il peso che una certa variabile ha sul modello: una volta selezionati i parametri governanti una certa risposta del modello si vuole definire tramite simulazioni iterative come quest'ultima sia influenzata dalla modifica delle variabili selezionate.

Si vuole analizzare la sensibilità di alcuni parametri sul consumo della VF1 nella procedura di omologazione WLTP. Essendo il sistema multi-variabile, la modifica di una singola

variabile non è lineare con l'output; c'è perciò la necessità di effettuare diversi test e definire una matrice di valori tale da poter definire in modo univoco gli effetti di una certa variabile sul risultato, selezionando come risposta del modello il consumo sul ciclo omologativo. Si può dunque utilizzare una tecnica chiamata "*Design of Experiments*" (DoE) la quale è un processo stocastico, un modello empirico capace di modellare dati multi-dimensionali.

Prima di valutare quali siano i parametri più influenti sulla strategia bisogna definire il parametro più importante che influisce sulla strategia e quindi sulla gestione dell'energia a bordo del veicolo: lo stato di carica della batteria ad alto voltaggio. Questa ha una certa capacità ed in funzione dell'energia disponibile in batteria possiamo parlare di *State Of Charge* (SOC): se la batteria è completamente carica il SOC è pari al 100%, mentre se è completamente scarica il SOC è nullo. Bisogna inoltre distinguere se si parla di SOC lordo o SOC netto/relativo: dato che, se si carica o scarica troppo la batteria a lungo andare questa potrebbe danneggiarsi, si deve cercare di utilizzare la batteria solo in un certo range di SOC. Il SOC utilizzabile per ragioni di durata varia in un range dal 15% al 95% lordo; inoltre l'efficienza della batteria cala drasticamente al di fuori di questo range dato che aumenta la resistenza interna di quest'ultima. Quindi si pone il 15% lordo pari allo 0% relativo e il 95% lordo pari al 100% relativo:

- SOC lordo 15% → SOC relativo 0%
- SOC lordo 95% → SOC relativo 100%

Per i valori intermedi si utilizza un'interpolazione lineare: un delta SOC relativo del 10% corrisponde ad un delta SOC lordo pari all' 8%.

Nella centralina Motronic i valori di SOC sono espressi in maniera relativa: per esempio nella calibrazione base i parametri che definiscono i limiti di SOC, i quali stabiliscono se siamo in condizioni di carica bassa o carica alta, sono:

- Limite inferiore stato di carica *Inf (carica bassa)*: 19% SOC lordo → 5% relativo
- Limite inferiore stato di carica *Sup (carica alta)*: 23% SOC lordo → 10% relativo

Quindi nella seguente trattazione si parlerà principalmente di SOC relativo, essendo quello utilizzato dalla centralina Motronic per la gestione della strategia di controllo.

Per ottenere risultati più attendibili e di maggiore utilità si è deciso di selezionare i parametri governanti le regole di controllo della strategia utilizzata e, per ognuno di questi, si è creata una matrice di valori dove ad uno sweep del parametro selezionato corrisponde uno sweep del SOC target, ovvero il valore di SOC al quale si punta e che influenza la gestione della carica in batteria; in questo modo si può ottenere un'analisi di sensibilità tale da poter identificare il trend del consumo per ognuno dei parametri selezionati. Sono stati selezionati alcuni parametri tra quelli maggiormente influenti in modo da valutare l'andamento del consumo in funzione della variazione del parametro interessato e fare una prima analisi di sensibilità.

I parametri che influenzano lo stato di carica della batteria sono essenzialmente i seguenti:

- *eDriveHVBattSupActvSOC* (modello Driver) → Soglia di SOC HVB al di sopra della quale si entra in modalità *eDrive esteso* (ovvero la possibilità di procedere in eDrive fino ad alte velocità) e si esce dalla modalità *eDrive limitato* (ovvero la possibilità di procedere in eDrive a basse velocità);
- *eDriveHVBattInfActvSOC* (modello Driver) → Soglia di SOC HVB al di sotto della quale si entra nella modalità *eDrive limitato*;
- *CoPOM_rReISOCDes_M* (modello ECU) → Valore target di SOC HVB in funzione della velocità della vettura in km/h;
- mappa *CoPOM_trqDesEIM_M* (modello ECU) → Valore di coppia LPM P1/P2 in funzione del Δ SOC (SOC HVB – SOC target) e della coppia richiesta al pedale.

In base al valore soglia di SOC per carica alta (*eDriveHVBattSupActvSOC*) e alla mappa dei valori target di SOC (*CoPOM_rReISOCDes_M*) posso avere due diversi scenari:

- SOC target < SOC carica alta → Il SOC parte da un certo valore e procedendo in eDrive si arriva al limite inferiore del SOC; inizia quindi la ricarica della batteria HV fino a che non si raggiunge il valore di SOC target, per poi rimanere stabile su questo valore;
- SOC target > SOC carica alta → Il SOC parte da un certo valore e procedendo in eDrive si arriva al limite inferiore del SOC; inizia quindi la ricarica della batteria HV fino a che non si raggiunge il valore di SOC a carica alta che consente il rientro in

eDrive (se le condizioni lo permettono). A questo punto il SOC cala ritornando sul limite inferiore; si procede così seguendo un andamento oscillante del SOC: risulta più conveniente come strategia ma meno ripetibile dato che non è facile prevederne l'andamento ed è fortemente dipendente dalle condizioni iniziali.

Nel grafico sottostante sono rappresentati i due differenti scenari in un ciclo WLTC CD: in blu il primo caso, dove si può notare un andamento praticamente costante, e in rosso il secondo, che ha un andamento più oscillante.

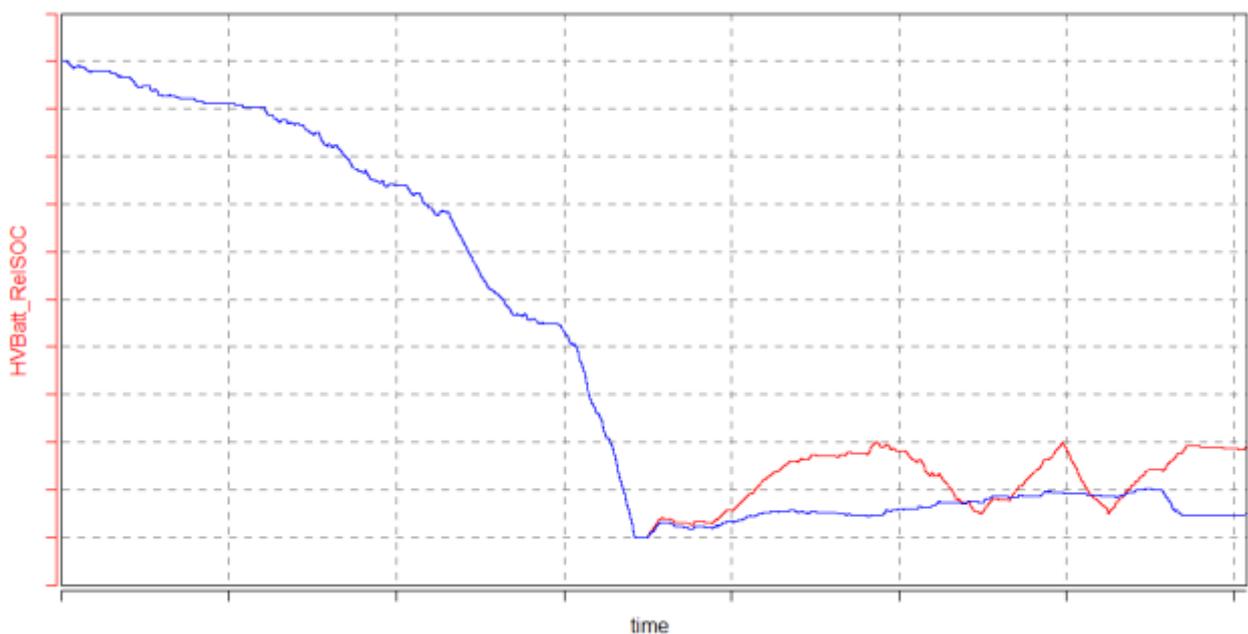


Figura 23 - Andamento SOC HVB (due scenari differenti)

Inoltre si vuole valutare l'effetto della variazione delle soglie di velocità minime e massime che governano l'ingresso in eDrive e l'accensione del motore endotermico (uscita da eDrive):

- *eDriveVStartInf* → Soglia di velocità al di sopra della quale si accende l'ICE ("Start") in condizioni di carica bassa ("Inf");
- *eDriveVStartSup* → Soglia di velocità al di sopra della quale si accende l'ICE ("Start") in condizioni di carica alta ("Sup");
- *eDriveVStopInf* → Soglia di velocità al di sotto della quale si spegne l'ICE ("Stop") in condizioni di carica bassa ("Inf");

- *eDrive/StopSup* → Soglia di velocità al di sotto della quale si spegne l'ICE ("Stop") in condizioni di carica alta ("Sup").

Nel ciclo omologativo WLTC vi è un profilo di velocità tale per cui si raggiungono velocità elevate solo nella parte finale del ciclo, quindi le soglie di velocità di accensione/spegnimento dell'ICE in condizioni di carica alta non sono così influenti dato che il SOC alla fine del ciclo CS è mediamente basso. Questo però non è sempre vero dato che se si calibrasse la mappa di coppia LPM P1/P2 (*CoPOM_trqDesEIM_M*), o eventualmente la mappa di SOC target, in modo tale da forzare la ricarica della batteria, si arriverebbe a fine ciclo in una condizione di carica alta. Inoltre variando i valori di SOC target (*CoPOM_rReISOCDes_M*) è come se si spostasse lungo l'asse delle ordinate (Δ SOC) la mappa *CoPOM_trqDesEIM_M*: dunque quando si modifica una di queste due mappe bisogna tenere in considerazione gli "effetti" che si hanno sull'altra, quindi modificarne una in funzione dell'altra.

Con coppia LPM P1/P2 si intende la coppia aggiunta alla richiesta di coppia al pedale per essere rigenerata, e quindi frenata, dal ME P1/P2: maggiore sarà questa coppia e maggiore sarà l'energia recuperata nella batteria ad alto voltaggio andando però a peggiorare la guidabilità, dato che si rischia di utilizzare il motore ad alto carico in quei momenti in cui la richiesta da parte del guidatore è moderata. L'obiettivo è quindi quello di cercare di utilizzare il motore endotermico nella maniera più efficiente possibile andando ad evitare zone di funzionamento a bassa efficienza, ovvero punti motore ad elevato consumo specifico: nei momenti in cui il driver richiede di utilizzare il motore in queste zone c'è la possibilità di spostare il punto motore in una zona più efficiente, aumentando il carico, ed utilizzare questa coppia aggiuntiva per ricaricare la batteria ad alto voltaggio tramite il motore elettrico P1/P2 (il quale sta generando energia opponendo coppia resistente): si tratta del *Load Point Movement* (o *Load Point Shifting*). Se utilizzassimo una coppia LPM P1/P2 positiva andremmo ad aiutare l'ICE, ma con un rendimento molto basso: questo è dovuto al fatto che bisogna passare per l'efficienza del cambio (cosa che non succede in caso di utilizzo da parte del ME P4) e contemporaneamente si riduce l'efficienza dell'ICE dato che lavoro a carico più basso; questa opzione è dunque da scartare. L'opzione più vantaggiosa è dunque utilizzare una coppia LPM negativa, il che significa utilizzare il ME

P1/P2 come generatore recuperando la coppia aggiuntiva data dal motore endotermico, il quale sta lavorando a carico più alto e quindi ad efficienza più elevata: in questo modo il motore endotermico consuma di più nei momenti in cui è acceso ma, lavorando ad efficienza più elevata, si ricarica la batteria ad alto voltaggio (con il carico aggiuntivo) e si può utilizzare quest'energia rigenerata per procedere in eDrive, quindi vi è la possibilità di spegnere l'ICE prima: questo energeticamente corrisponde ad eliminare le friction e le perdite per pompaggio. Dunque questo recupero di efficienza permette di spegnere l'ICE per più tempo e dunque guadagnare in termini energetici, pur consumando leggermente di più nelle fasi a motore acceso.

Per analizzare la sensibilità del sistema alla variazione di alcuni parametri si sono svolte simulazioni andando a modificare un singolo parametro alla volta, effettuando quindi uno sweep di valori per ognuno di questi in modo da trovare un intervallo di confidenza per ciascun parametro: nella seguente immagine si possono visualizzare i risultati ottenuti simulando una procedura di omologazione WLTP (tuttavia per semplicità si mostreranno solo gli andamenti del consumo su ciclo CS). Per quei parametri che sono dipendenti da più di una variabile, come ad esempio la mappa di coppia LPM ($CoPOM_{trqDesEIM_M}$) invece che effettuare uno sweep di valori è stato applicato un guadagno a tutta la mappa.

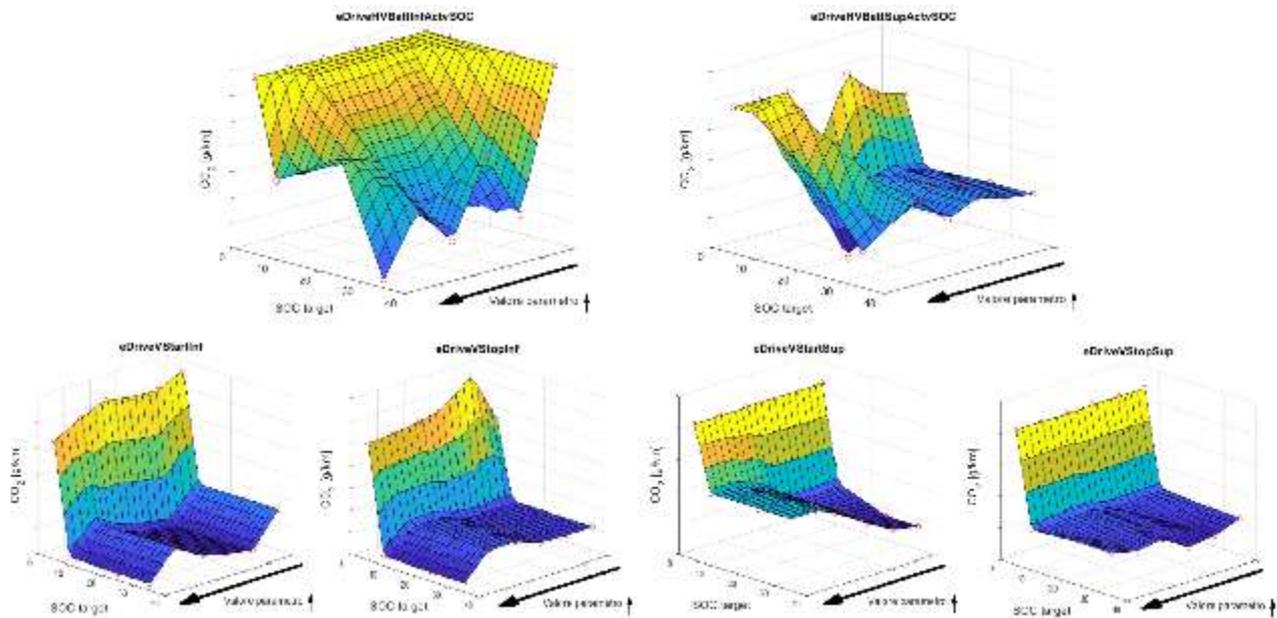


Figura 24 - Risultati analisi sensibilità parametri sul consumo

È chiaro che essendo un modello abbastanza complesso un'analisi di sensibilità di questo tipo non dà informazioni molto intuitive, essendo le variabili intrinsecamente dipendenti tra loro: ad esempio la variabile *eDriveVStopSup* sembra che non influenzi i consumi (per bassi valori di SOC target), ma è semplicemente dovuto al fatto che essendo la parte ad alte velocità a fine ciclo e riferendosi allo stato di carica alta (condizione che non si presenta se non aumento il SOC target e quindi se non raggiungo lo stato di carica *Sup*) questa non entra mai in gioco. Le soglie di velocità a carica bassa invece incidono maggiormente sui consumi, anche per bassi valori di SOC target. Si possono inoltre valutare i benefici ottenibili da una modifica hardware, come ad esempio l'utilizzo di una batteria a capacità più elevata. È stata effettuata un'analisi di sensibilità anche su quest'ultima: si può evidenziare un punto di minimo per alti valori di SOC target, come si può vedere dalla seguente immagine. Nella stessa immagine vengono rappresentati inoltre anche i risultati dell'analisi svolta per la mappa di coppia LPM.

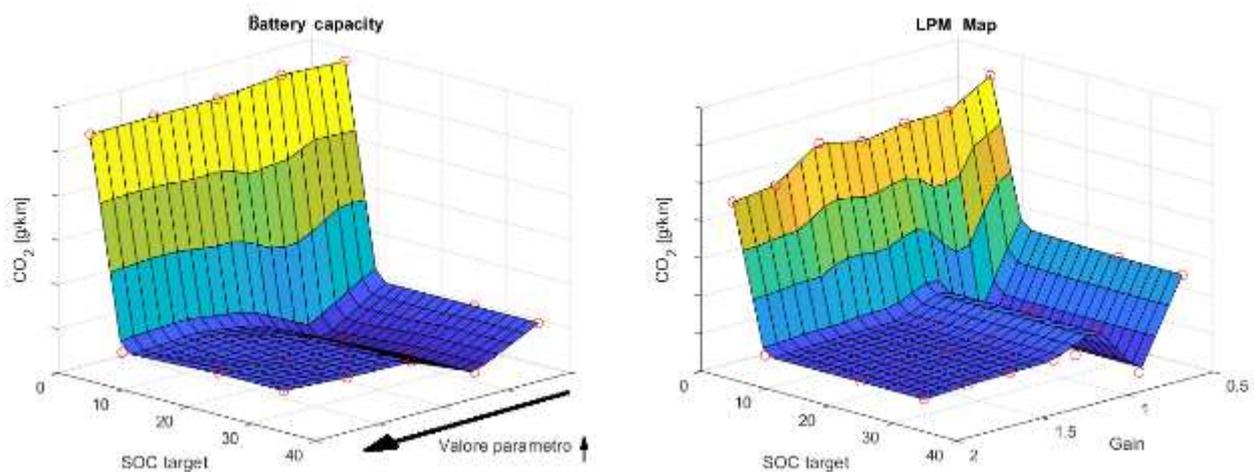


Figura 25 - Analisi sensibilità capacità batteria e mappa LPM

Per la coppia LPM è stato applicato un guadagno a tutta la mappa per valutarne la sensibilità: per alti valori di SOC target si può notare un punto di minimo, corrispondente ad un valore del guadagno minore di uno, il che indica che la mappa attualmente calibrata potrebbe essere troppo estrema e non permette di ottenere la massima efficienza del sistema. Di questo parametro si tratterà successivamente in questo capitolo in modo più dettagliato.

Dai risultati ottenuti si può estrapolare un'informazione molto interessante: si può constatare che la sensibilità alla variazione di SOC target sul consumo appare molto evidente e per ognuna delle variabili analizzate è possibile notare che all'aumento del SOC target corrisponde una relativa riduzione del consumo su ciclo. Comunque esaminando l'esito dell'analisi di sensibilità si possono fare alcune considerazioni importanti per valutare il range di valori ottimale per ogni variabile analizzata e ottenere informazioni per eventuali strategie di controllo tali da permettere una riduzione dei consumi e delle emissioni.

Un altro parametro che può influenzare l'efficienza complessiva della vettura è *RegBias* che decide quanta coppia di regenerative brake dev'essere rigenerata dai motori elettrici P4 e quanta invece dal motore elettrico P1/P2:

- se *RegBias* = 1 la coppia viene assorbita tutta dai P4 (limitata alla coppia massima, quella in eccesso va verso P1/P2) → risulta la via più vantaggiosa;
- se *RegBias* = 0 la coppia viene assorbita tutta da P1 (limitata alla coppia massima, quella in eccesso va verso P4) → più svantaggioso, passo anche dall'efficienza del cambio.

La coppia frenante richiesta dal driver viene quindi ripartita sui ME e per quella in eccesso si cerca di utilizzare il motore endotermico al quale viene attuata una riduzione di anticipo, ovvero una riserva di coppia di guidabilità, per fare in modo di avere una maggior coppia frenante; se il freno motore non dovesse bastare si utilizzano i freni della vettura. Si è notato che per un *RegBias* minore di 1 si ha un aumento dei consumi dato che, a differenza dei ME P4 che sono direttamente collegati alle ruote tramite delle connessioni dog-ring, il motore elettrico è posizionato prima della frizione e si deve quindi passare attraverso l'efficienza della trasmissione durante il recupero di energia. Quindi si opta per lasciare invariato questo parametro dato che mediamente l'efficienza complessiva del ME P4 e dei dogring è maggiore di quella del ME P1/P2 moltiplicata per quella della trasmissione. Anche in caso di rilascio pedale, piuttosto che attuare una riduzione di anticipo per avere una maggiore coppia frenante del motore endotermico (riserva di coppia di guidabilità), e quindi maggiore inefficienza, si decide di frenare e recuperare quest'energia tramite i ME (i due P4 e il P1) e colmare l'eventuale coppia rimanente con il freno motore.

Si considera ora l'influenza che hanno i valori di coppia LPM: per ogni punto motore esistono infinite combinazioni di split di coppia ICE/P1 dato che il sistema è a tre gradi di libertà. Su questa mappa si hanno però dei limiti dettati dalla guidabilità dato che se si richiede troppa coppia al motore endotermico, anche quando la richiesta di coppia è limitata, si potrebbe avere una peggior guidabilità. Si deve fare in modo di avere una coppia LPM P1 sempre più ridotta con l'aumentare della coppia richiesta al pedale (in termini percentuali rispetto alla coppia richiesta) per una migliore sensazione di guida. Conoscendo le mappe di efficienza del motore endotermico e del motore elettrico P1 in funzione dei giri si può selezionare un regime (nel caso in figura 1200 rpm) e combinare le due mappe di efficienza per ottenerne una che comprenda entrambe le efficienze in funzione della coppia P1 e della coppia PT: con coppia PT (Powertrain) si intende la coppia richiesta all'albero motore che equivale alla coppia dell'ICE sommata alla coppia del ME P1. In questo modo per ogni valore della coppia richiesta al powertrain si conosce la coppia P1 ottimale da attuare per ottenere la massima efficienza del sistema.

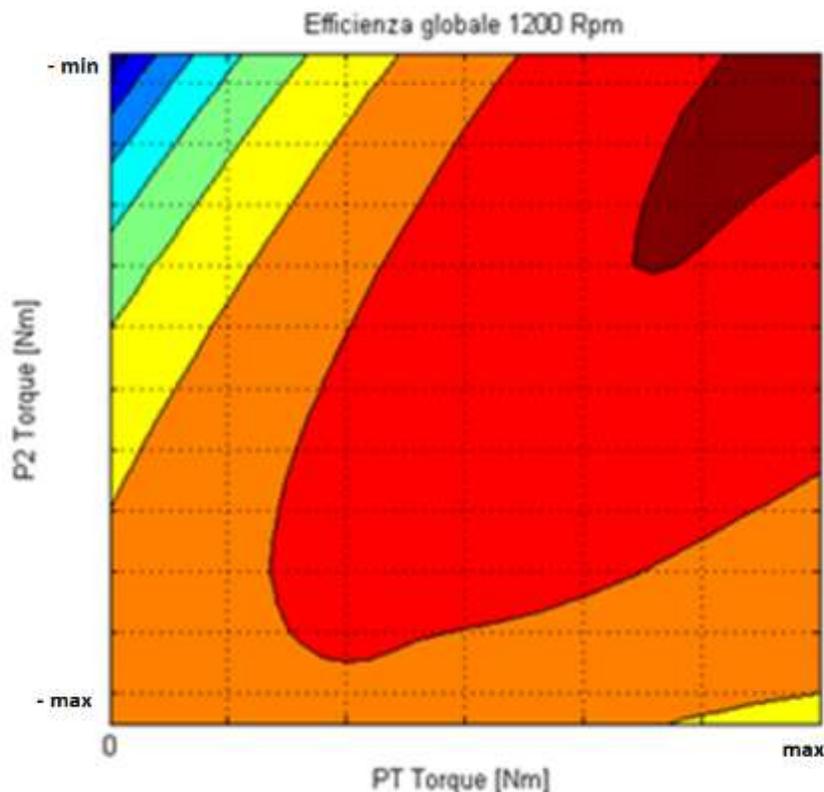


Figura 26 - Efficienza globale powertrain in funzione della coppia P1 e della coppia PT

Questa mappa è ottimizzata ma solamente per un singolo valore di regime del motore: è possibile implementare nel modello una mappa LPM ottimizzata che dipenda inoltre dalla velocità di rotazione dell'ICE.

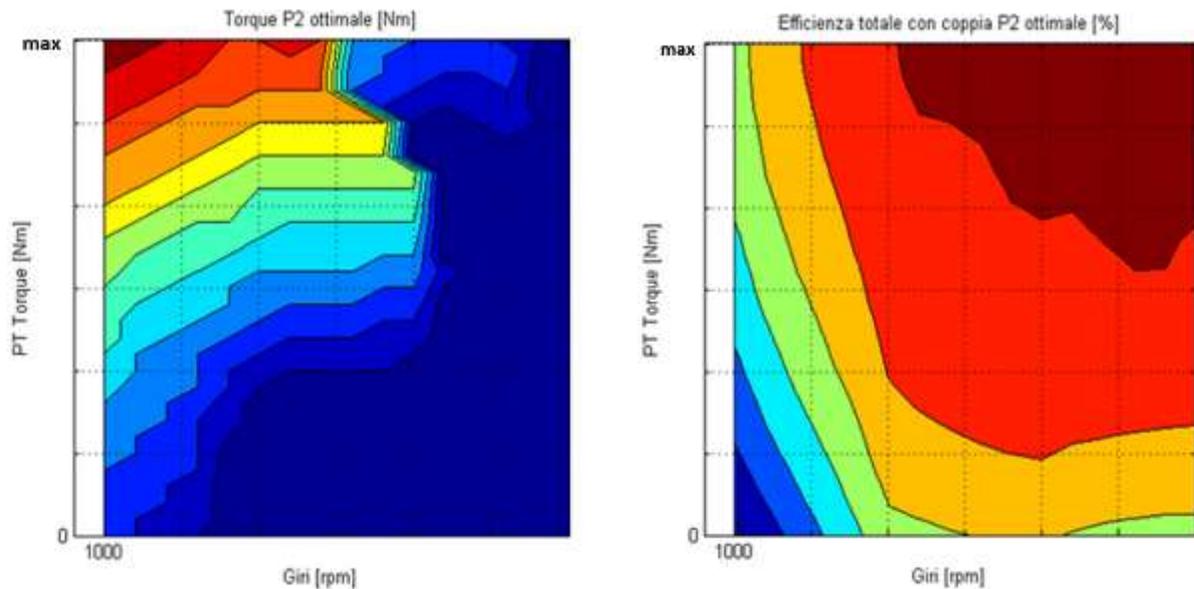


Figura 27 - Grafici coppia P1 ottimale ed efficienza globale PT (entrambi funzione di regime e coppia PT)

Quindi in funzione della coppia PT richiesta all'albero motore si può ritrovare tramite la prima mappa (grafico a sinistra) la coppia ottimale P1 e tramite la seconda (grafico a destra) l'efficienza totale del powertrain per ottenere la coppia reale in uscita dall'albero motore.

Nel modello vi è dunque un parametro che definisce quale strategia di ottimizzazione della coppia LPM si voglia utilizzare:

- $EnLPMOpt = 0$ → viene abilitata la mappa calibrata in ECU;
- $EnLPMOpt = 1$ → viene abilitata la parte di modello che utilizza le due mappe della coppia P1 ottimale e dell'efficienza totale in funzione dei giri.

Grazie quindi all'analisi di sensibilità si sono ricavati degli intervalli di confidenza per ogni parametro analizzato e, tramite questi, è possibile proseguire con lo sviluppo di nuove strategie di controllo combinando i vantaggi che si possono ottenere dalla variazione dei valori dei parametri interessati e dalla modifica delle regole di ingresso e uscita da eDrive.

Nel prossimo capitolo si analizzeranno e si svilupperanno le strategie ottimali di controllo tali da ottenere una riduzione dei consumi e quindi una maggiore efficienza del sistema.

2.2. Sviluppo strategie di controllo

L'approccio di ottimizzazione di un sistema di propulsione ibrido in fase di progettazione si può schematizzare in tre diversi livelli:

1. Ottimizzazione dell'architettura del powertrain;
2. Ottimizzazione dei componenti;
3. Ottimizzazione della strategia di controllo.

In questo elaborato non verranno trattati i primi due livelli di ottimizzazione, essendo già stati ottimizzati e definiti in una precedente fase di progettazione, ma si concentrerà l'attenzione sul terzo livello, quindi sull'ottimizzazione della strategia di controllo.

Lo sviluppo di una strategia di controllo ottimale di un veicolo ibrido deve prevedere non solo di recuperare ma anche di utilizzare l'energia nel modo più efficiente possibile. Si deve quindi valutare quando e come utilizzare i motori elettrici in funzione della loro mappa di efficienza e come effettuare lo split di coppia tra motori elettrici e motore endotermico. Bisogna utilizzare quest'ultimo in zone ad alta efficienza ed evitarne l'utilizzo laddove si hanno inefficienze come l'utilizzo a basso carico. Dopo aver fatto considerazioni sulla strategia di controllo attuale si valutano le possibili modifiche alla strategia di controllo e, una volta simulate con l'ausilio del modello Simulink precedentemente descritto, è possibile trovare quali siano le modifiche che apportano benefici e quali invece siano ininfluenti o peggiorative. Verranno quindi sviluppate alcune strategie per entrambe le vetture, prima per la VF1 poi sull'altro modello con architettura diversa, la VF2.

Le vetture in questione dispongono di specifiche funzionalità, differenti per ogni posizione del manettino (selettore montato sul volante per selezionare la modalità di utilizzo del veicolo). Il manettino dunque ha il compito di differenziare le strategie di gestione delle funzioni del sistema ibrido. Può assumere 4 diverse posizioni che corrispondono a 4 diverse funzionalità della vettura:

- *eDrive*: posizione manettino di pura marcia elettrica. È previsto l'utilizzo dei soli motori elettrici per l'avanzamento della vettura e non è prevista l'accensione dell'ICE. In questa modalità si hanno le massime prestazioni in marcia elettrica;
- *Hybrid (normal, recharge, hold)*: posizione manettino di massima efficienza del veicolo, garantisce una gestione dinamica della potenza secondo l'EMS. Assieme all'efficienza mantiene anche le caratteristiche di performance. Sono previste sia la modalità di marcia puramente elettrica che di marcia ibrida;
- *Performance*: posizione del manettino in cui è prevista marcia puramente ibrida con le potenzialità del sistema elettrico limitate in termini di prestazioni massime;
- *Qualifying*: posizione del manettino in cui è prevista marcia puramente ibrida con massimo utilizzo delle potenzialità del sistema elettrico. È la funzione di massima performance dove viene utilizzata l'intera potenza installata.

Sono previste strategie di funzionamento e calibrazioni differenti per le diverse funzionalità, al variare quindi della posizione del manettino. Le funzioni si ritengono tali perché coinvolgono il sistema ibrido in quanto powertrain (ICE, ME, HVB); dunque, al variare della posizione del manettino, ogni funzione è caratterizzata da una risposta diversa del powertrain. All'inserimento della chiave la vettura si inizializza in posizione Hybrid normal.

Nel seguente trattazione si concentrerà l'attenzione su una specifica funzione della vettura, ovvero la modalità Hybrid. Le regole su cui si basa la strategia base vengono di seguito brevemente descritte in modo da valutare se ci siano ulteriori condizioni da implementare tali da ottimizzare l'utilizzo dei propulsori e la gestione dell'energia in batteria.

Le transizioni da marcia ibrida a marcia elettrica avvengono secondo i seguenti criteri:

- Coppia richiesta al pedale minore della coppia abilitazione eDrive;
- Velocità minore della velocità massima in eDrive (per quella condizione di carica);
- SOC maggiore del minimo valore impostato;
- Conclusione del catalyst heating.

Queste condizioni devono essere soddisfatte contemporaneamente (AND) per permettere la transizione tra marcia ibrida e marcia elettrica. Le transizioni da marcia elettrica a marcia ibrida avvengono invece secondo i seguenti criteri:

- Coppia richiesta al pedale maggiore della coppia massima in eDrive;
- Coppia disponibile minore della coppia di disabilitazione eDrive;
- Velocità maggiore della velocità massima in eDrive (per quella condizione di carica);
- Valore dello stato di carica minimo;
- Temperatura del catalizzatore minore di quella minima richiesta.

Per uscire dalla modalità eDrive dunque basta che sia soddisfatta una sola di queste condizioni (OR).

Nella seguente immagine si può visualizzare il ciclo di isteresi sulla velocità massima in eDrive che dipende da due valori di SOC che definiscono se siamo in uno stato di carica alta o bassa.

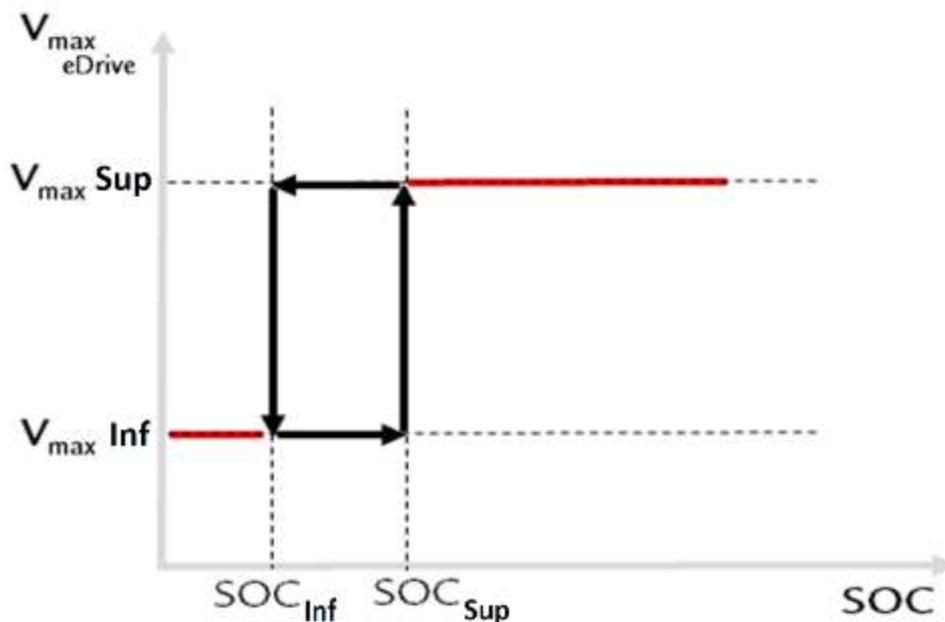


Figura 28 - Isteresi della velocità massima eDrive in funzione del SOC vettura

Dunque, una volta che il SOC raggiunge lo stato di carica bassa la velocità massima in eDrive si riporta al suo valore minimo; caricando poi la batteria e arrivando alla soglia di

carica alta la velocità massima risale fino al suo valore massimo. Per capire meglio la strategia può venire in aiuto questo grafico esemplificativo della strategia base.

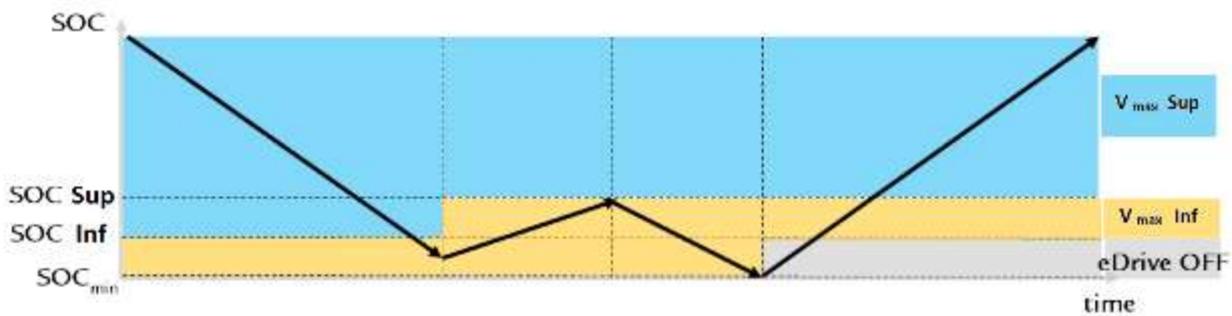


Figura 29 - Esempio applicativo della strategia utilizzata

Una volta analizzata la strategia attualmente utilizzata in vettura è possibile valutare le possibili tecniche per procedere ad un'ottimizzazione della strategia di controllo.

Le possibili strategie ottimizzate, tali da consentire una riduzione dei consumi in una procedura di omologazione, si incentrano essenzialmente su due obiettivi principali:

- Massimizzazione del SOC HVB a fine ciclo Charge Depleting;
- Massimizzazione della percentuale in eDrive su ciclo.

Una strategia che permetta di caricare molto la batteria ad alta tensione alla fine del ciclo CD consente di poter effettuare una lunga fase di eDrive nella parte iniziale del ciclo CS: nella calibrazione base questo non accade essendo il SOC target molto basso il che implica uno stato di carica relativamente basso ad inizio ciclo CS. Inoltre, generare molta energia per la batteria utilizzando una coppia LPM elevata durante le fasi a motore acceso permette di lavorare a maggior efficienza e spegnere l'ICE appena possibile per fare eDrive: energeticamente corrisponde a rimuovere almeno il consumo speso per le friction motore e pompaggio. Lo sviluppo di una strategia ottimizzata per VF1 si basa su questi obiettivi e per ottenere questi risultati si è agito principalmente sul SOC target, sulla coppia LPM e sulle regole di ingresso e uscita da eDrive. Per la VF1 si è quindi ricercata la strategia che minimizza il consumo e le emissioni su ciclo tramite calibrazione dei parametri più importanti; dopodiché, una volta ritrovate le calibrazioni ottimali, si sono implementate nel modello alcune modifiche alle regole che gestiscono l'entrata e l'uscita dalla modalità eDrive, di cui si parlerà in seguito.

Gli step di lavoro adottati per sviluppare nuove strategie ed analizzare la sensibilità di quest'ultime alla variazione di SOC target sono i seguenti:

- Sweep di SOC target sulla strategia eDrive attuale (strategia base);
- Applicata mappa LPM ottimizzata con sweep SOC target;
- Applicate nuove strategie di ingresso e uscita da eDrive con sweep SOC target.

Per ogni strategia analizzata verrà dunque effettuato uno sweep di SOC target per ritrovare il valore ottimale per quella specifica strategia. Le possibili modifiche alle regole di ingresso e uscita da eDrive sono state valutate sulla base dei risultati delle simulazioni e del comportamento della vettura sul ciclo omologativo in modo da aumentare la percentuale di guida eDrive su ciclo. Per fare in modo di soddisfare gli obiettivi imposti si è valutata l'implementazione di ulteriori regole che gestiscono il controllo dei propulsori, di seguito brevemente descritte.

Si può aggiungere una condizione per la quale è possibile restare in eDrive in ogni rampa fino a scaricare la batteria ($eDriveEnOutCondSOC = 1$): viene abilitata l'accensione del motore per superamento della soglia di velocità massima (per carica alta) solo nel caso in cui il valore del SOC raggiunga il limite di stato di carica bassa comprensivo di un valore di isteresi ($eDriveOutCondSOCHyst$).

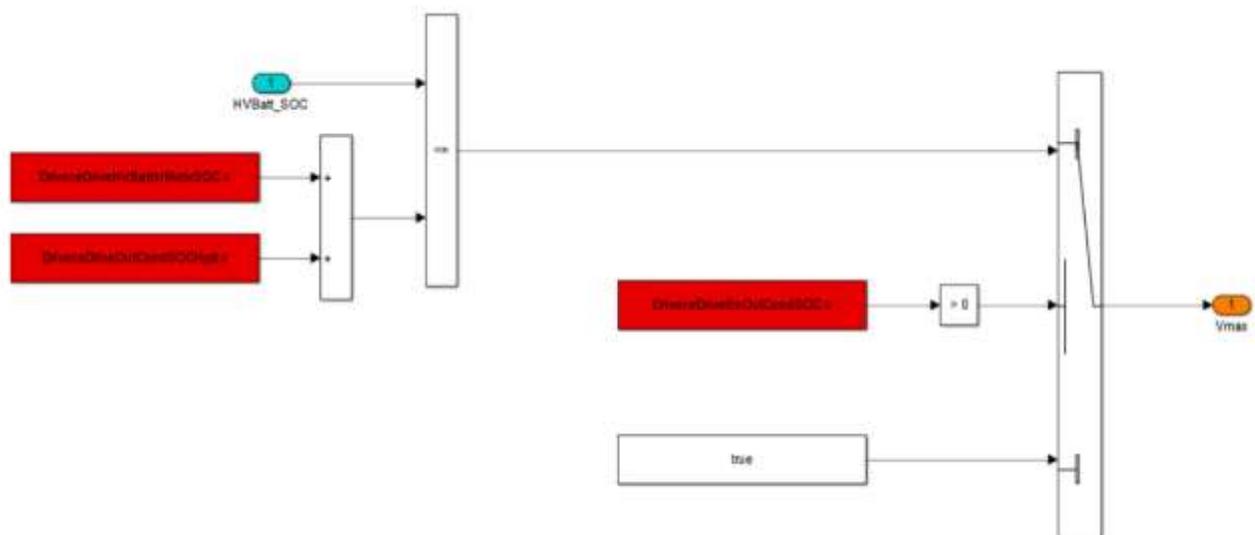


Figura 30 - Condizione accensione motore per soglia di velocità (modello Simulink)

Si può inoltre bypassare la condizione sulla soglia di velocità sotto la quale avviene lo spegnimento del motore endotermico ($eDriveVstopMode = 1$): una volta che la velocità scende sotto il valore definito per lo spegnimento dell'ICE si entra in eDrive e non si esce fino al raggiungimento del SOC minimo (oppure nel caso in cui la velocità istantanea superi la soglia di accensione dell'ICE); dunque si resta in eDrive anche se, passando da uno stato di carica alta ad uno stato di carica bassa, la soglia di velocità per lo spegnimento dell'ICE scende fino al valore impostato per carica bassa e la velocità della vettura risulta istantaneamente superiore alla soglia.

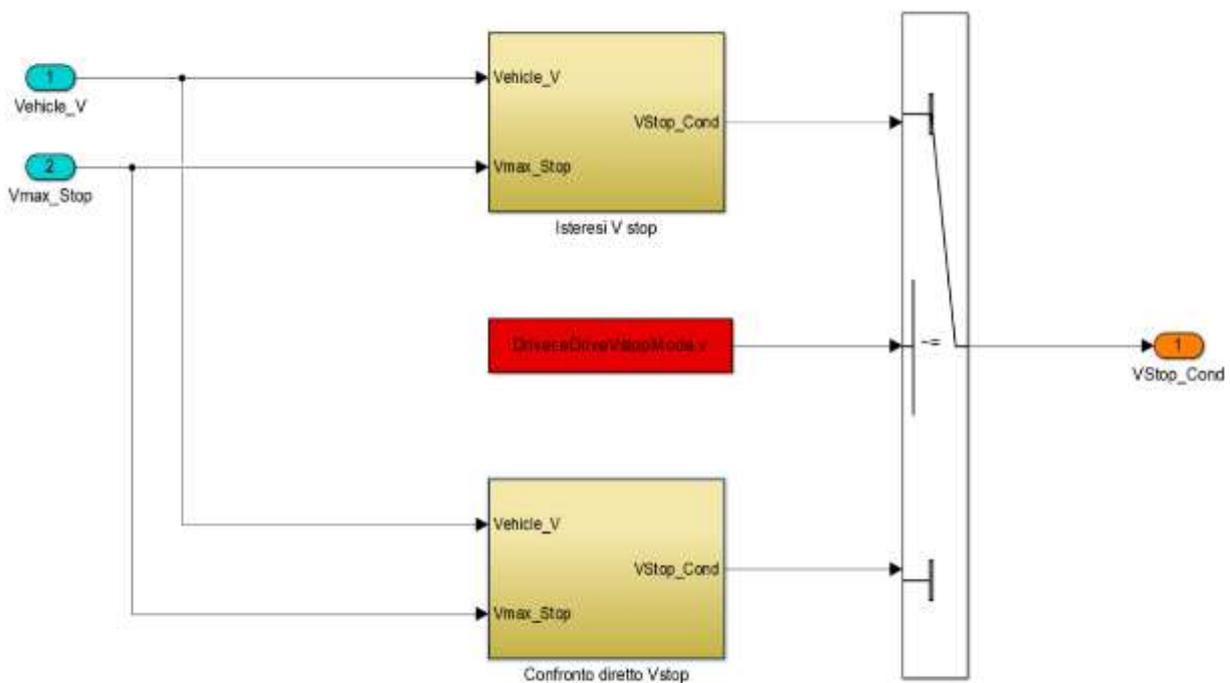


Figura 31 - Condizione eDrive (Isteresi velocità spegnimento ICE)

Si può inserire un'ulteriore condizione di rientro in eDrive con pedale rilasciato per più di un certo tempo ($eDrivePedCondTime$): una volta rientrati in eDrive per rilascio pedale restiamo in eDrive fino a scaricare la batteria, quindi fino a raggiungere il SOC minimo comprensivo di un valore di isteresi, dedicato a questa funzione ($eDrivePedCondSOCHyst$).

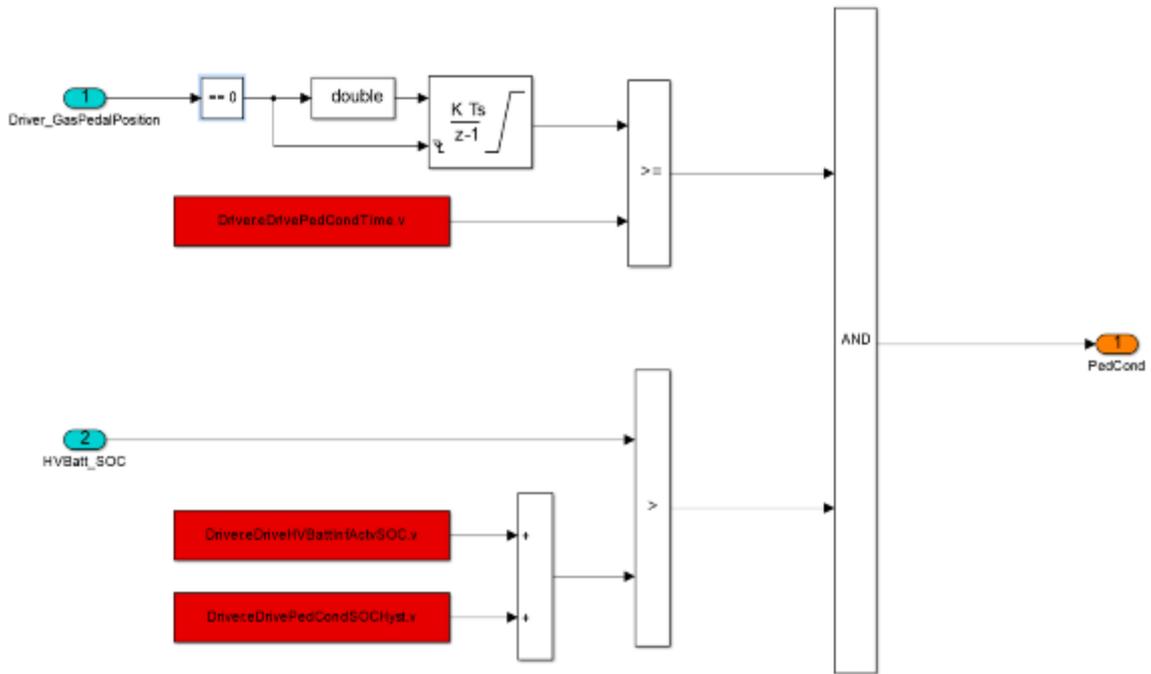


Figura 32 - Condizione di rientro in eDrive per pedale rilasciato (modello Simulink)

Si sono valutate quindi per VF1 l'influenza delle varie regole che determinano l'ingresso e l'uscita da eDrive e tramite simulazioni si sono analizzate quali tra queste risultano maggiormente benefiche per l'obiettivo di riduzione consumo. Una volta trovata la strategia ottimale per il modello VF1, si vuole tentare di trasporre la stessa sulla VF2. Questa vettura, come si è già visto, ha un'architettura diversa rispetto alla VF1 dato che non sono presenti i ME P4 sugli assali, ma solamente il ME P2 collocato prima della trasmissione (rispetto al ME P1 della VF1): vi è comunque la possibilità di marciare in eDrive ma con un'efficienza molto più ridotta rispetto alla VF1, dovendo passare anche dall'efficienza della trasmissione. Inoltre anche il motore a combustione interna che montano le due vetture non è lo stesso dato che il modello VF2 verrà equipaggiato con un motore endotermico V6 (rispetto al V8 della VF1): si avranno quindi strategie di controllo ottimizzate differenti dovute principalmente alle differenze tra le due architetture ma anche calibrazioni differenti (ad esempio di coppia LPM) dovute ai diversi piani quotati dei due motori. Per il modello VF2 si sceglie quindi di trasporre la strategia che minimizza i consumi sul modello VF1, per poi andare ad ottimizzarla tramite calibrazioni dedicate. Non essendoci i motori elettrici sull'assale anteriore, ma solamente un motore elettrico collocato tra la frizione e il cambio, l'efficienza totale in guida eDrive risulta più bassa

rispetto al modello VF1: se in quest'ultimo c'era la possibilità di recuperare alla massima efficienza utilizzando il ME P1 per coppia LPM e il ME P4 durante la frenata rigenerativa (fino al limite di coppia massima) e utilizzare l'energia alla massima efficienza utilizzando il ME P4, nel modello VF2 bisogna tenere in considerazione anche l'efficienza del cambio sia in recupero (in frenata rigenerativa) che in utilizzo del ME P2. Tenendo conto che l'efficienza del motore elettrico P2 moltiplicata per quella della trasmissione è mediamente pari al 75% sull'intero ciclo di potenza si ha un'efficienza complessiva del VF2 relativamente bassa rispetto alla VF1, considerando che quella del motore elettrico P4 moltiplicata per quella dei dogring è mediamente pari al 90%. Andando quindi a confrontare le mappe di efficienza a livello delle ruote si può notare la differente efficienza che si ha durante la guida eDrive per la VF2 rispetto alla VF1: per il confronto si è utilizzata l'ottava marcia.

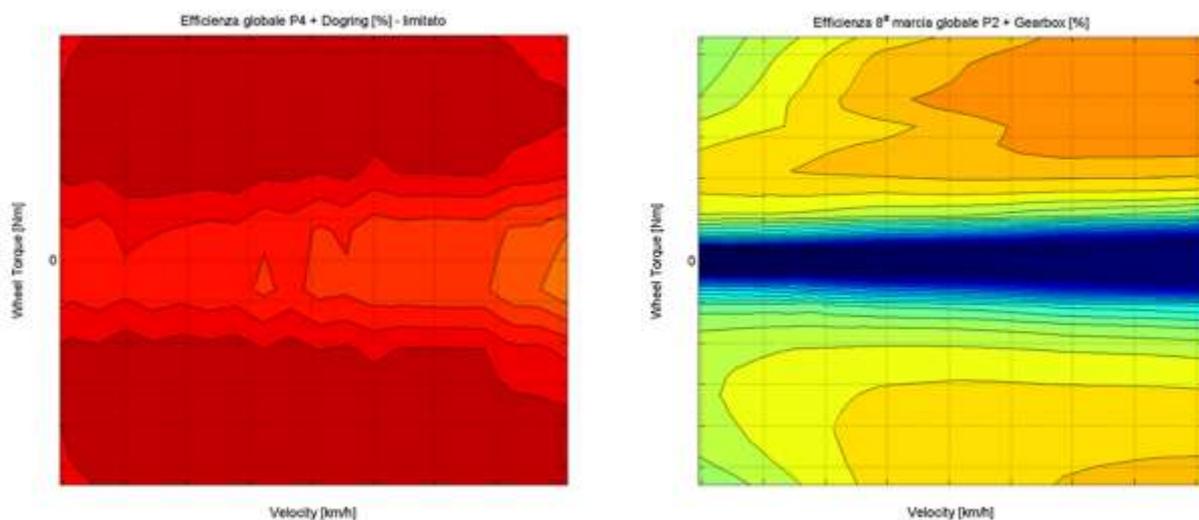


Figura 33 - Confronto mappe di efficienza P4 + dogring con P2 + gearbox (In ottava marcia)

La scala di colori utilizzata è la medesima per i due grafici ed anche il range di velocità e coppia che viene visualizzato è lo stesso (per un confronto qualitativo): si nota che non è possibile utilizzare la medesima strategia del VF1 per ottimizzare il modello VF2 perché non sembra apportare benefici sul modello ma bisogna ottimizzare la strategia eDrive per fare in modo di evitare zone di inefficienza dell'ICE ma anche zone dove il motore elettrico P2 è meno efficiente. Inoltre bisogna considerare che la guida eDrive è eseguita solo da quest'ultimo per cui, per fare in modo che la velocità della vettura segua quella desiderata,

bisogna ottimizzare l'utilizzo del cambio. C'è la necessità di avere una cambiata a regimi diversi per l'eDrive dato che il motore elettrico ha una mappa di efficienza molto diversa da quella dell'ICE; bisogna però prestare attenzione anche alle transizioni dalla guida eDrive all'accensione dell'ICE per evitare di peggiorare lato guidabilità e l'affidabilità della vettura. C'è la necessità quindi di utilizzare due mappe di upshift/downshift differenti per la guida eDrive e nel caso di ICE acceso (preselezione eDrive).

L'ottimizzazione dell'efficienza in fase eDrive basata solamente sull'aumento del regime di utilizzo non è sufficiente ad identificare i parametri più adatti per ridurre i consumi: utilizzando una mappa di cambiata differente (se siamo a ICE acceso o se in modalità eDrive), in modo tale da sfruttare il motore elettrico P2 ad un'efficienza più alta, può portare ad un aumento dei consumi dato che, avendo aumentato il regime di utilizzo (innalzamento shift pattern) della macchina P2 in modalità eDrive, sono aumentati però gli attriti della trasmissione che sono decrescenti con la velocità di rotazione e crescenti con la coppia: si rischia perciò di ottenere un bilancio totale negativo. C'è la possibilità di variare il regime di funzionamento del P2 in modalità eDrive per trovare un compromesso tra aumento di efficienza P2 e riduzione degli attriti di trasmissione: si valuta l'efficienza complessiva del powertrain per ricavare una mappa di cambiata in eDrive ottimizzata sull'efficienza totale. Per capire quali siano i punti di massima efficienza, considerando sia l'efficienza del cambio che l'efficienza del motore elettrico P2, si calcolano le mappe di efficienza (P2+gearbox). Si ripete questo procedimento per ogni singola marcia dato che le mappe di efficienza della trasmissione variano da marcia a marcia: si avranno quindi 8 mappe di efficienza P2+gearbox in funzione della coppia all'albero motore e dei giri motore. Per poter confrontare tutte le mappe bisogna riportarle in funzione della velocità vettura e della coppia alle ruote. Utilizzando uno script Matlab si possono costruire tutte le 8 mappe partendo dalle mappe di efficienza della trasmissione e del motore elettrico P2: queste vengono combinate e interpolate in modo da ottenere 8 mappe nei punti motori stabiliti. Dovendo tenere in considerazione l'efficienza anche in caso di recupero, ovvero coppia negativa, si devono costruire mappe con valori di coppia oltre che positivi anche negativi: la mappa di efficienza della trasmissione, essendo riferita solamente a coppie positive, è stata specchiata in modo tale da avere una mappa completa anche in caso di coppia negativa, quindi durante il recupero.

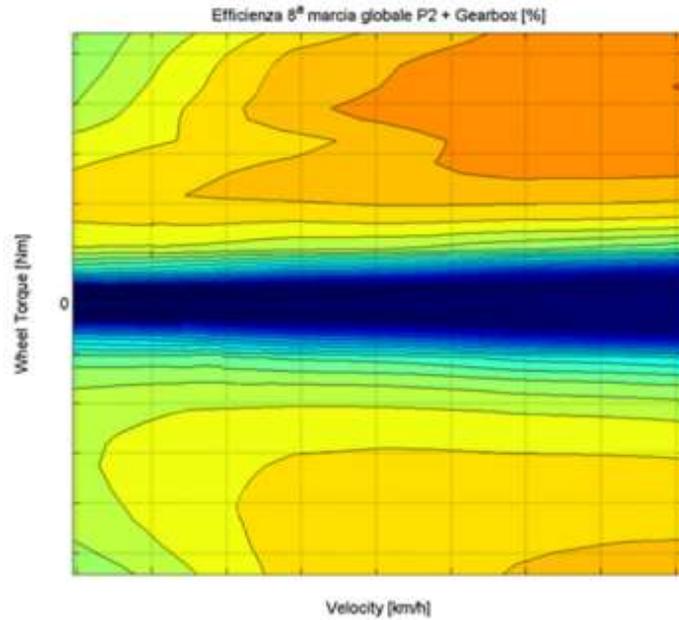


Figura 34 - Efficienza globale powertrain durante eDrive in ottava marcia

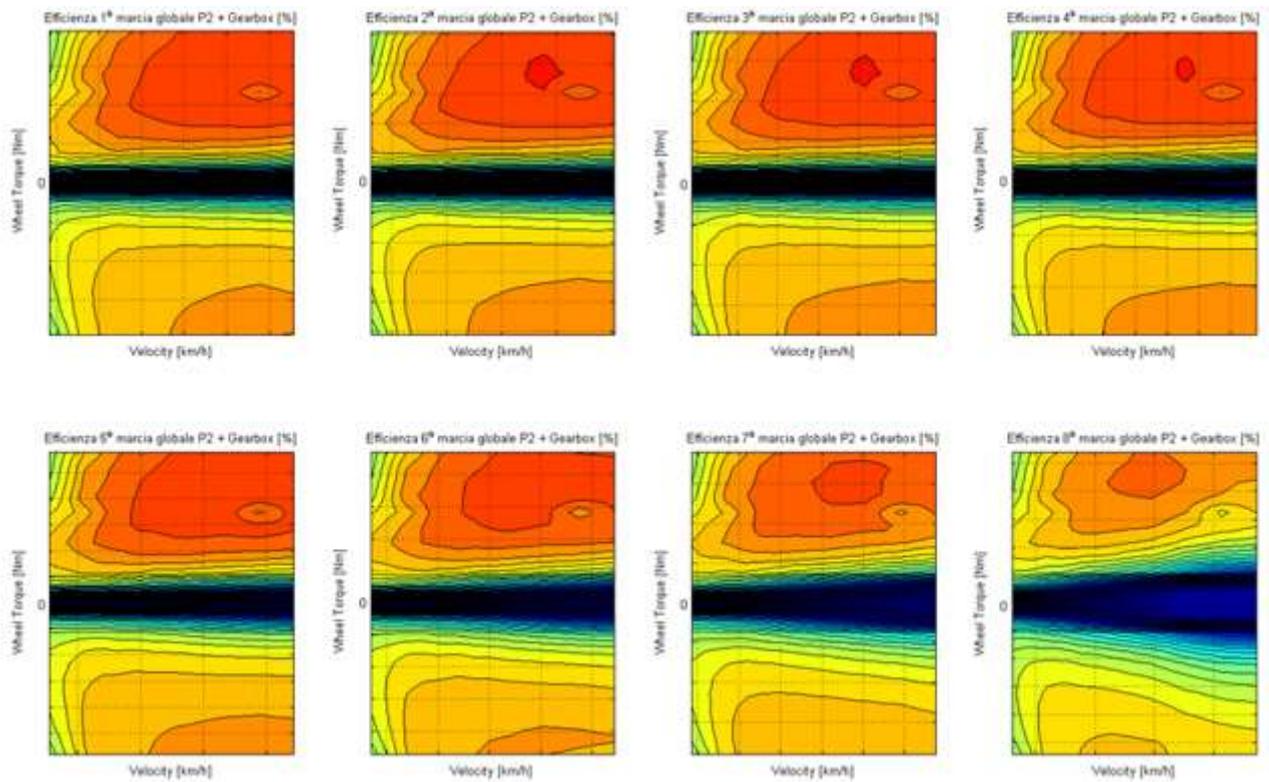


Figura 35 - Efficienza globale powertrain durante la guida eDrive (efficienza P2 + gearbox) per ogni marcia

Una volta trovate tutte le mappe di efficienza si può andare a calcolare la marcia ottimale durante la guida eDrive in funzione della velocità e dei valori di coppia alle ruote. Si è

estrapolata dalle simulazioni la traccia di velocità e la traccia di coppia alle ruote di un ciclo WLTC: di seguito viene riportata la traccia di coppia campionata in un test simulato.

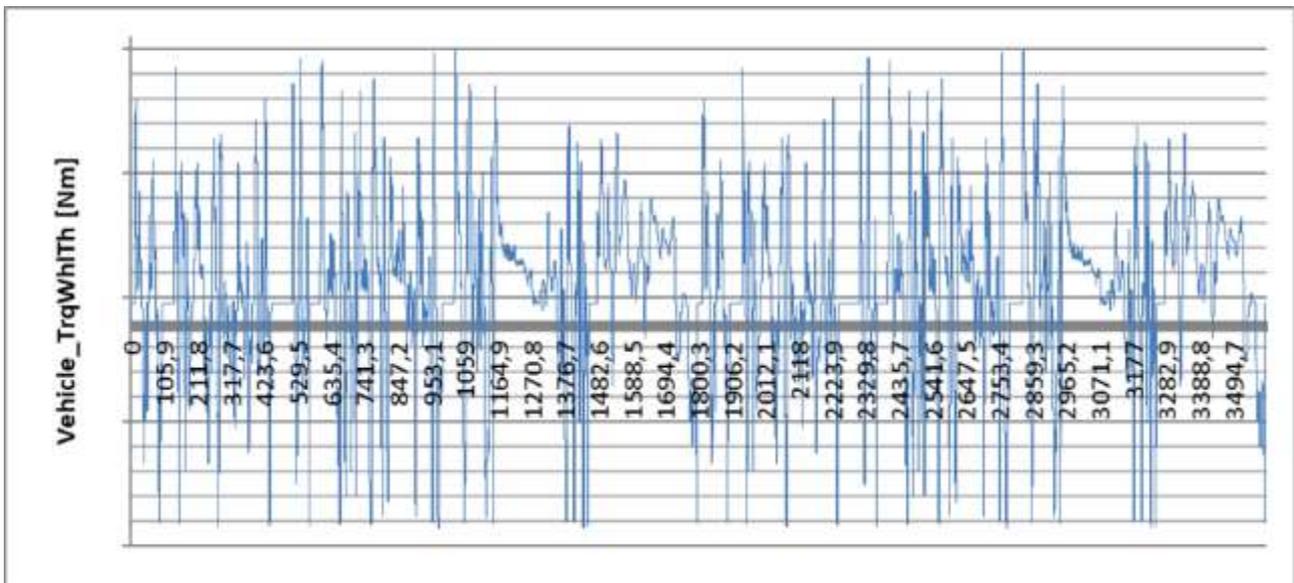


Figura 36 - Traccia di coppia alle ruote estrapolata da un ciclo WLTC

Dunque, dovendo inserire all'interno del modello un profilo di cambiata in guida eDrive basato sulla velocità si deve trovare una strategia di cambiata basata sulle mappe di efficienza: tramite l'ausilio di un foglio di calcolo si può calcolare una mappa di marcia ottimale in funzione della velocità vettura e della coppia alle ruote; confrontando le 8 mappe di efficienza P2+trasmissione si può ricavare una mappa di marcia ottimale in funzione della velocità della vettura e della coppia alle ruote. Conoscendo la traccia di coppia su un ciclo WLTC si riesce a calcolare un valore di coppia alle ruote media richiesta su ciclo in modo da estrapolare dalla mappa di cambiata ottimale il vettore (corrispondente a quel valore di coppia) per rendere la cambiata indipendente dalla richiesta di coppia istantanea ma dipendente solo dalla velocità della vettura.

Si ha però un limite inferiore (marcia minima disponibile) dettato dalla coppia massima erogabile del ME P2 che diminuisce con l'aumentare dei giri motore; inoltre si può inserire un'altra condizione di marcia massima dettata dal regime di cambiata in upshift, per fare in modo di rientrare con un regime superiore ad una certa soglia (in questo caso è stato scelto un regime di rientro pari a 990 rpm).

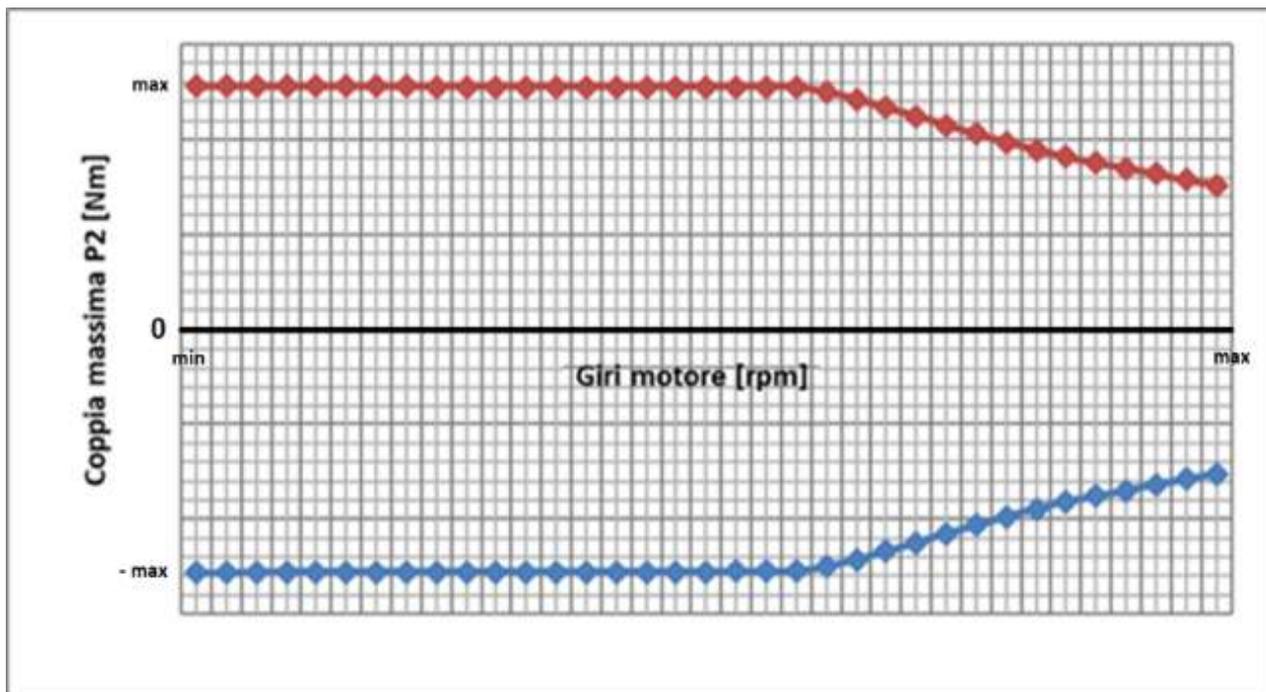


Figura 37 - Coppia massima P2 disponibile in funzione della velocità di rotazione

Utilizzando quindi la mappa di marcia ottimale (ottimizzata solo ed esclusivamente tramite le mappe di efficienza) e i vincoli appena descritti è possibile estrapolare una mappa di cambiata ideale basata sull'efficienza del P2 moltiplicata per quella della trasmissione. In questo modo si riesce ad utilizzare l'energia accumulata in batteria nel modo più efficiente possibile durante la guida eDrive; inoltre anche nella fase di recupero si può recuperare nella maniera più efficiente possibile. Nella seguente immagine si possono visualizzare tre diverse mappe di cambiata: la linea azzurra identifica una cambiata basata solamente sul regime di rientro (impostata come limite massimo), quella verde basata esclusivamente sulle mappe di efficienza (marcia a massima efficienza) e quella arancione è lo shift pattern ottimizzato per la guida eDrive comprensivo dei limiti imposti dal regime di rientro.

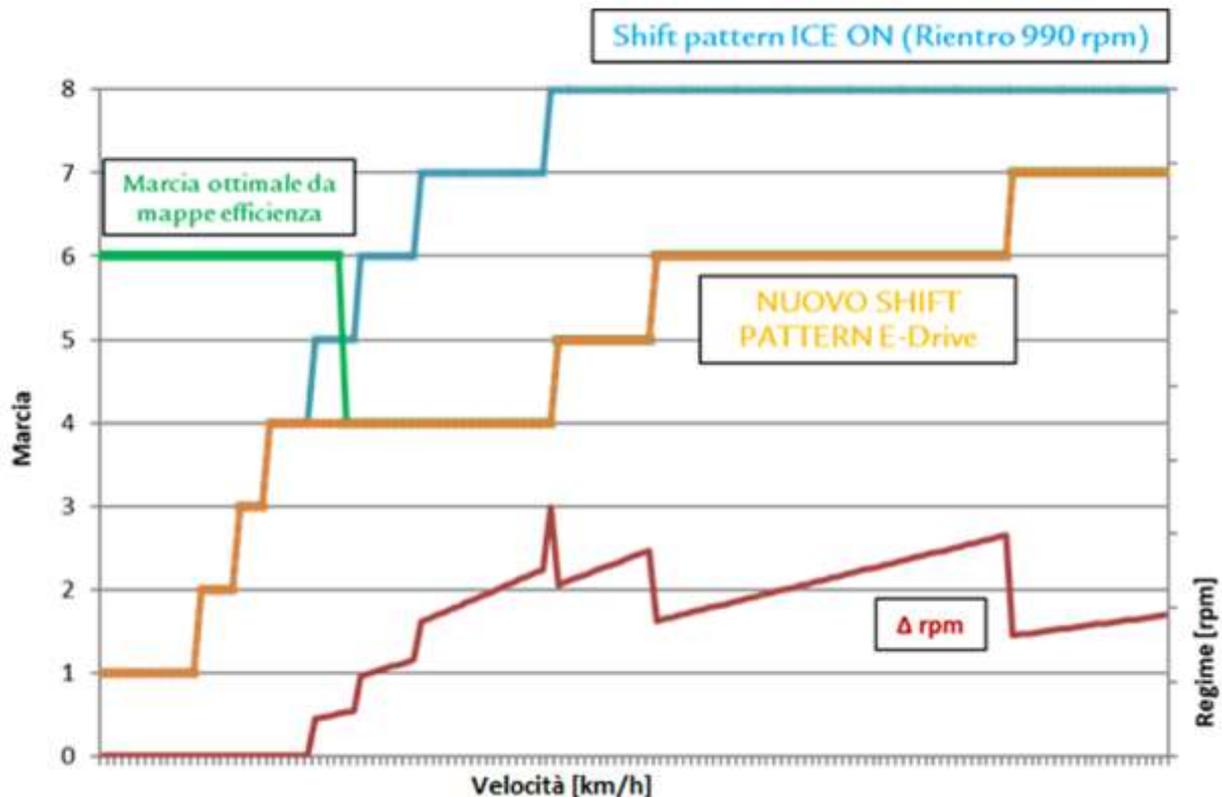


Figura 38 - Shift pattern a ICE ON e nuovo shift pattern durante guida eDrive

Una volta effettuata la calibrazione sulla strategia di cambiata in guida eDrive si implementa questa mappa di cambiata (linea arancione) nel modello per vedere l'effetto sui consumi. Bisogna inoltre considerare che nella transizione tra marcia eDrive e marcia con ICE acceso vi è la necessità di cambiare marcia laddove le due curve si discostino. Bisogna quindi controllare che durante queste transizioni non ci siano ritardi in fase di cambiata o problemi di guidabilità dovuti alla differenza di regime tra marcia a ICE ON e marcia eDrive (curva rossa nel grafico riportato precedentemente).

Dopodiché sono state eseguite altre simulazioni facendo uno sweep di regime di rientro (da 990 rpm a 2990 rpm ogni 500 rpm) senza tenere conto della marcia ottimale precedentemente calcolata: sono state così implementate queste 5 diverse mappe di cambiata basate solamente sul regime di rientro e ne si è valutata l'influenza sui consumi.

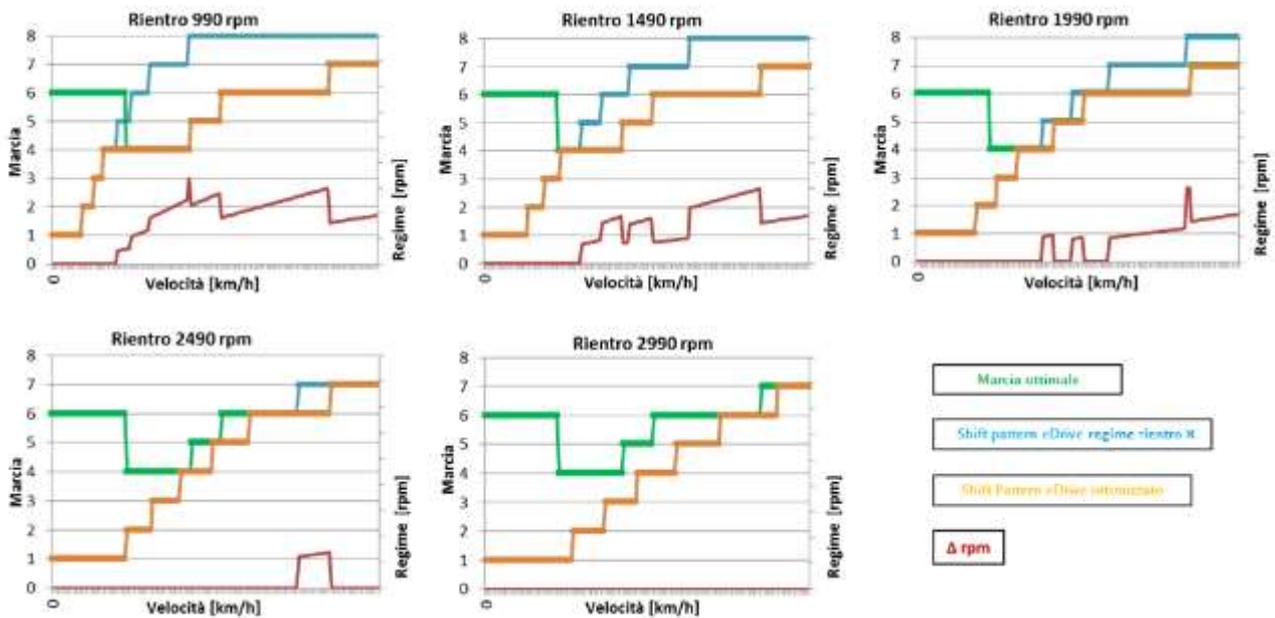


Figura 39 - Sweep regime di rientro

Nel grafico è mostrata in verde la marcia ottimale precedentemente calcolata, in blu lo shift pattern definito unicamente dal regime di rientro (limite superiore) e in arancione quello invece ottimizzato tenendo conto del limite superiore: si può notare che aumentando il regime di rientro oltre i 2000 rpm ci si allontana dalla marcia ottimale. Nell'ultimo grafico si vede chiaramente che la curva arancione, che identifica lo shift pattern ottimizzato, è completamente sovrapposta alla curva blu, la quale indica lo shift pattern definito unicamente dal regime di rientro: non risulta quindi ottimizzata.

3. Sintesi risultati

Dopo aver analizzato le variabili più importanti del modello e dopo aver valutato i possibili effetti che queste possono avere sul risultato si può passare ad analizzare e simulare le possibili strategie proposte e sviluppate nel capitolo precedente.

In questo capitolo si analizzeranno i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate con il modello Simulink per le diverse strategie sviluppate. Per entrambi i modelli, sia per la VF1 che per la VF2, sono state effettuate diverse prove con uno sweep di SOC target e si è analizzato l'andamento dei consumi per le diverse strategie di controllo proposte.

Sono state eseguite diverse prove, prima utilizzando la strategia eDrive attuale e poi applicando le nuove strategie, e si sono analizzati i risultati per trovare una correlazione tra la modifica dei parametri e l'andamento dei consumi su ciclo. Si selezionano quindi tra tutte le simulazioni quelle più interessanti e si plottano su un grafico "consumi - SOC target" con riferimento alla calibrazione base: si può così valutare il trend delle varie prove e le differenze nei consumi sui cicli depleting, sustaining e combinato.

Per tutte le strategie sono stati definiti i parametri fondamentali che regolano le condizioni di entrata e uscita da eDrive. Di seguito vengono definite le soglie di velocità utilizzate per tutte le strategie descritte.

Tabella 3 - Soglie di velocità

eDriveVStartSup [km/h]	135	Velocità accensione ICE per stato di carica Sup
eDriveVStopSup [km/h]	130	Velocità spegnimento ICE per stato di carica Sup
eDriveVStartInf [km/h]	20	Velocità accensione ICE per stato di carica Inf
eDriveVStopInf [km/h]	15	Velocità spegnimento ICE per stato di carica Inf

Sono stati definiti inoltre i valori di SOC minimi e massimi per la batteria ad alta tensione i quali definiscono il range di SOC utilizzabile, ovvero da 0% a 100% relativo.

Tabella 4 - Soglie di SOC minimo e massimo

NomSOCMax [% abs]	95 (0% rel)	Soglia massima SOC che definisce il 100% relativo
NomSOCMin [% abs]	15 (0% rel)	Soglia massima SOC che definisce lo 0% relativo

3.1. VF1: nuova strategia eDrive 1

La “nuova strategia 1” si basa principalmente su un incremento del SOC target: utilizzando la strategia eDrive base ed applicando una mappa di coppia LPM ottimizzata si nota una significativa riduzione del consumo combinato rispetto alla strategia attuale.

Tabella 5 - Calibrazioni "nuova strategia 1" VF1

eDriveHVBattSupActvSOC [% abs]	23 (10% rel)	Soglia di SOC per stato di carica alta
eDriveHVBattInfActvSOC [% abs]	19 (5% rel)	Soglia di SOC per stato di carica bassa
CoPOM_trqDesEIM_M [Nm]	max -170	Mappa di coppia LPM
CoPOM_rRelSOCDes_M [% rel]	Da ottimizzare	SOC target

Di seguito vengono definite le regole di ingresso e uscita dalla modalità eDrive.

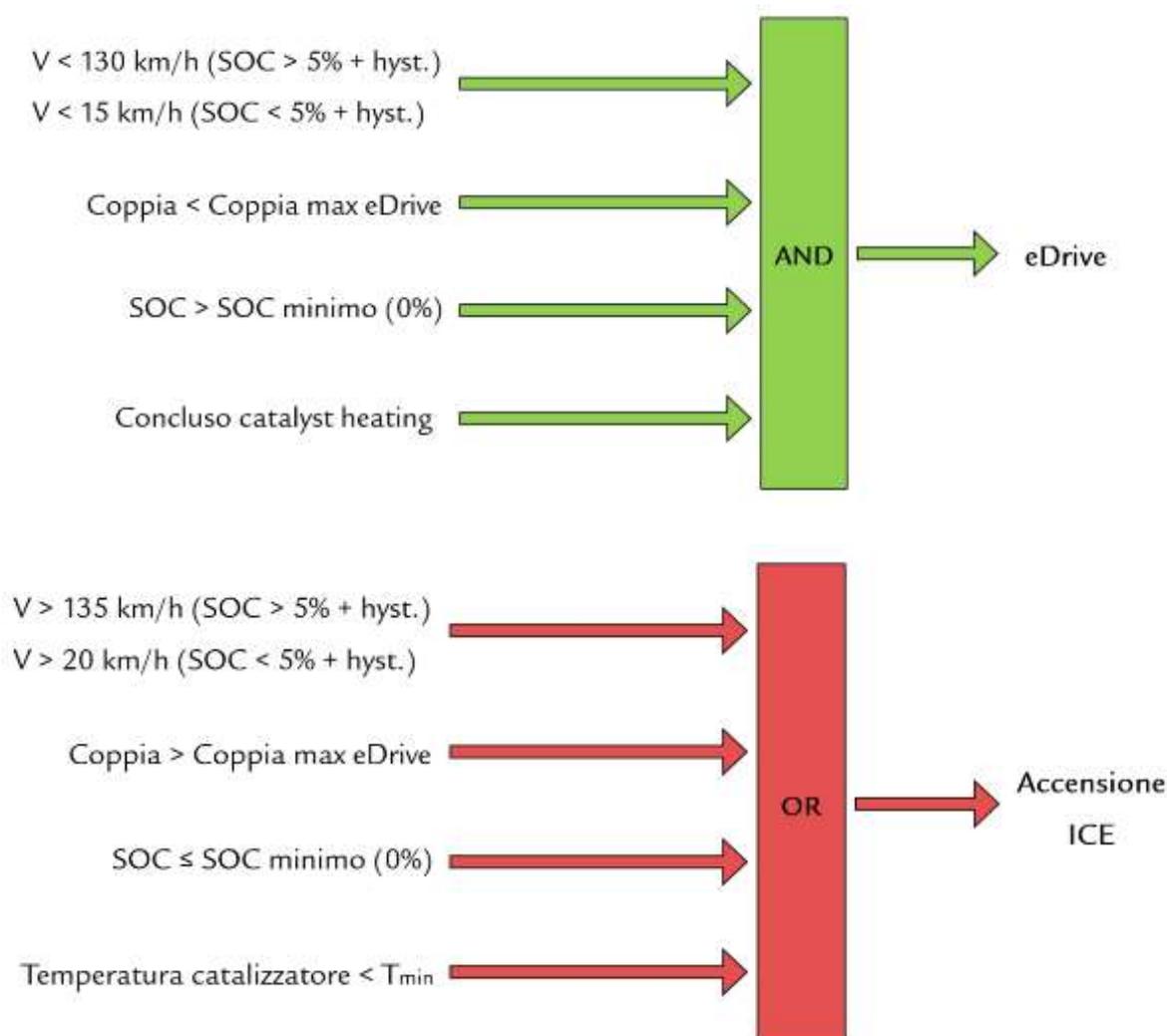


Figura 40 - Regole di ingresso e uscita da eDrive “nuova strategia 1”

Aumentando il SOC target si va a forzare il motore per caricare la batteria dato che la coppia LPM risulta indirettamente maggiorata (dovuto alla mappa di coppia LPM che dipende dal Δ SOC). Nel seguente grafico sono riportati nel grafico a sinistra i risultati ottenuti dalle simulazioni mentre in quello a destra gli stessi valori pesati dei cicli sustaining (in rosso), depleting (in verde) e combinato (in blu). Dato che il valore che si vuole ridurre è il consumo sul ciclo combinato, essendo quello da riportare per l'omologazione del veicolo, conviene utilizzare un valore di SOC target in un range ottimale tale da minimizzare i consumi sul combinato.

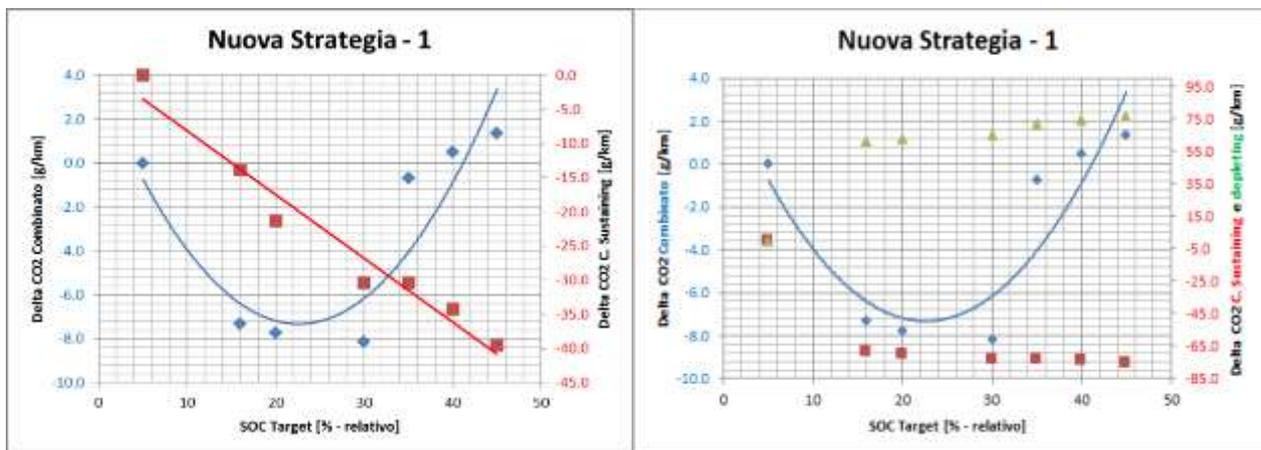


Figura 41 - Andamento del consumi VF1 su ciclo combinato e su ciclo sustaining In funzione del SOC target (nuova strategia 1)

Si sottolinea una significativa riduzione del consumo sul ciclo CS ed un leggero miglioramento in CD grazie alla “nuova strategia 1”: mentre per i consumi sul ciclo CS si vede una riduzione con andamento monotono, per il consumo combinato invece vi è un’inversione di tendenza per SOC target > 30%. Quindi un valore del SOC target compreso tra il 10% e il 30% permette di minimizzare i consumi: da simulazione si ottiene un punto di minimo con riduzione di -8 g/km sul consumo combinato e -30 g/km su ciclo CS. L’andamento monotono sul ciclo CS è chiaramente riconducibile ad uno stato di carica ad inizio ciclo sempre più elevato all’aumentare del SOC target: questo corrisponde ad una maggiore distanza percorsa in eDrive su ciclo e quindi ad un minor utilizzo dell’ICE, dunque minori consumi. Sul ciclo combinato invece vi è un’inversione di tendenza per SOC target troppo elevati principalmente dovuto ad un utilizzo troppo intensivo dell’ICE per ricaricare la batteria.

3.2. VF1: nuova strategia eDrive 2

La strategia precedentemente sviluppata è stata ottenuta tramite la calibrazione di alcuni dei parametri più influenti sul sistema di controllo. Questa strategia invece impone non solo differenti calibrazioni ma anche modifiche alle regole su cui si basa la strategia di ingresso/uscita dalla modalità eDrive: si è deciso quindi di aggiungere alcune condizioni che permettono di bypassare le attuali regole di ingresso/uscita da eDrive.

Tabella 6 - Calibrazioni "nuova strategia 2" VF1

eDriveHVBattSupActvSOC [% abs]	27 (15% rel)	Soglia di SOC per stato di carica alta
eDriveHVBattInfActvSOC [% abs]	19 (5% rel)	Soglia di SOC per stato di carica bassa
eDriveEnOutCondSOC [-]	1	Bit per condizione accensione ICE su VStart
eDrivePedCondTime [s]	3	Tempo di rilascio pedale per rientro in eDrive
CoPOM_trqDesEIM_M [Nm]	max -170	Mappa di coppia LPM
CoPOM_rRelSOCDes_M [% rel]	Da ottimizzare	SOC target

Vi è una strategia che è possibile abilitare da modello: è possibile bypassare la condizione di uscita dalla guida eDrive, anche se si supera la soglia di velocità limite, fino a che non si scarica la batteria: si riesce quindi ad aggirare la condizione sulla velocità massima di eDrive, dipendente dalla carica della batteria, sia di accensione sia di spegnimento ICE; si abilita l'accensione del motore per superamento della soglia di velocità solo in caso di batteria scarica ($eDriveEnOutCondSOC = 1$).

Inoltre è stata implementata la condizione di rientro in eDrive che dipende dalla posizione del pedale: c'è la possibilità di rientrare in eDrive se viene rilasciato il pedale per più di un certo tempo, tenendo ovviamente in considerazione tutte le altre condizioni per il rientro (non è possibile farlo ad esempio se il SOC è minimo). È stato impostato un limite di tempo oltre il quale, se le condizioni di carica della batteria lo permettono, è possibile rientrare in eDrive e rimanerci fino a che il SOC non raggiunge il livello minimo impostato, comprensivo di una soglia di isteresi dedicata a questa condizione.

Di seguito vengono definite le regole di ingresso e uscita dalla modalità eDrive, diverse dalla strategia precedentemente analizzata.

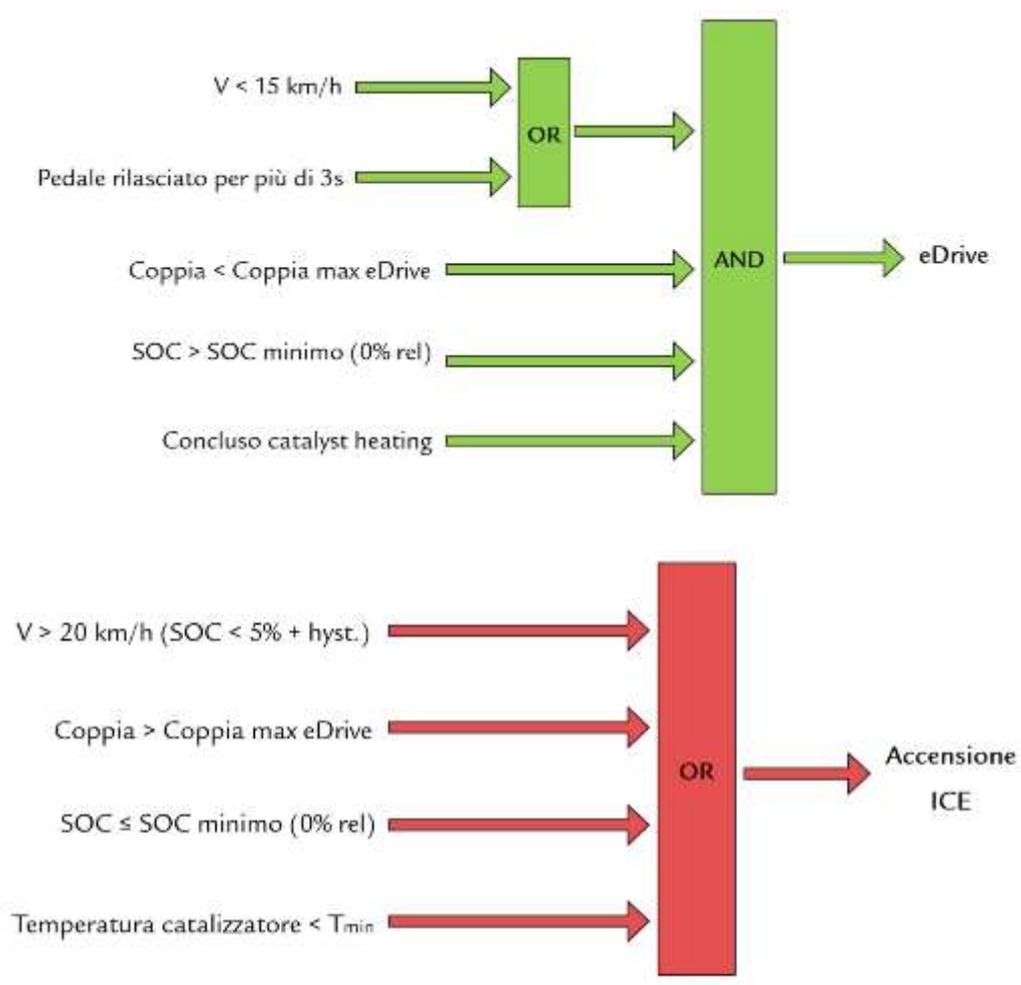


Figura 42 - Regole di Ingresso e uscita da eDrive “nuova strategia 2”

Per poter capire meglio la strategia applicata può venire in aiuto questo grafico esemplificativo della strategia che illustra l'andamento del SOC della batteria ad alto voltaggio ed i relativi cicli di carica e scarica.

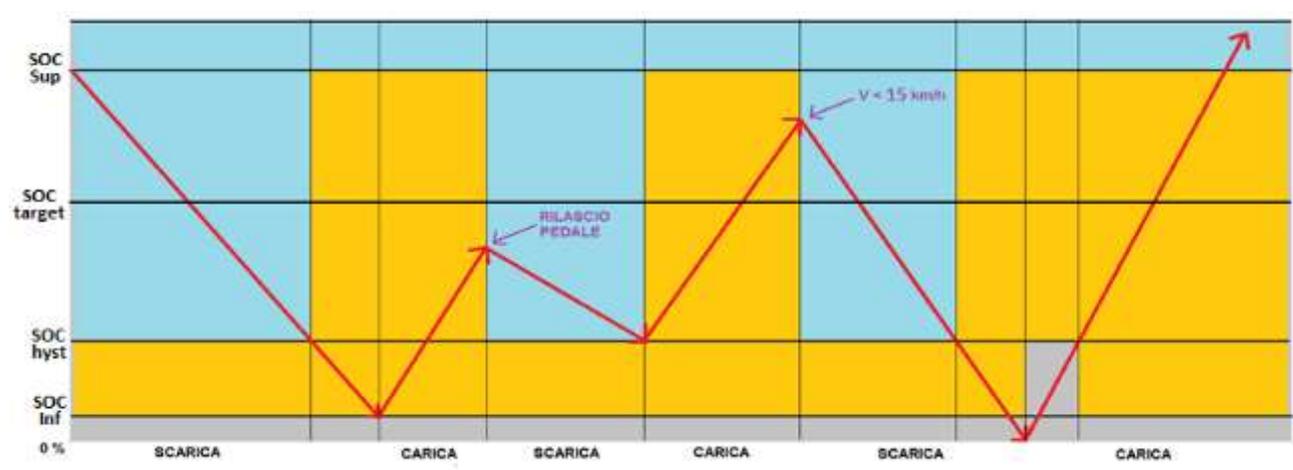


Figura 43 - Esempio nuova strategia 2

Considerando come “eDrive esteso” la possibilità di guidare in modalità puramente elettrica fino alla velocità massima e come “eDrive limitato” fino alla velocità minima possiamo andare ad analizzare un esempio applicativo della nuova strategia 2 per chiarire più nel dettaglio le modifiche di guidabilità.

Si possono evidenziare tre diverse zone:

- Nella zona azzurra l’eDrive esteso è sempre abilitato;
- Nella zona arancione l’eDrive esteso viene abilitato non appena viene rilasciato il pedale per più di un certo tempo o se la velocità vettura scende sotto la velocità di rientro;
- Nella zona grigia l’eDrive esteso è sempre disabilitato.

Si può notare inoltre che quando si rientra in eDrive per pedale rilasciato si scarica la batteria fino al limite inferiore (comprensivo di una soglia di isteresi di SOC) mentre se si rientra in eDrive per velocità minore di quella minima si scarica completamente la batteria.

Andando ora a valutare gli effetti di una variazione di SOC target sulla nuova strategia sviluppata si può valutare il trend del consumo (CS e combinato) e il suo valore ottimale.

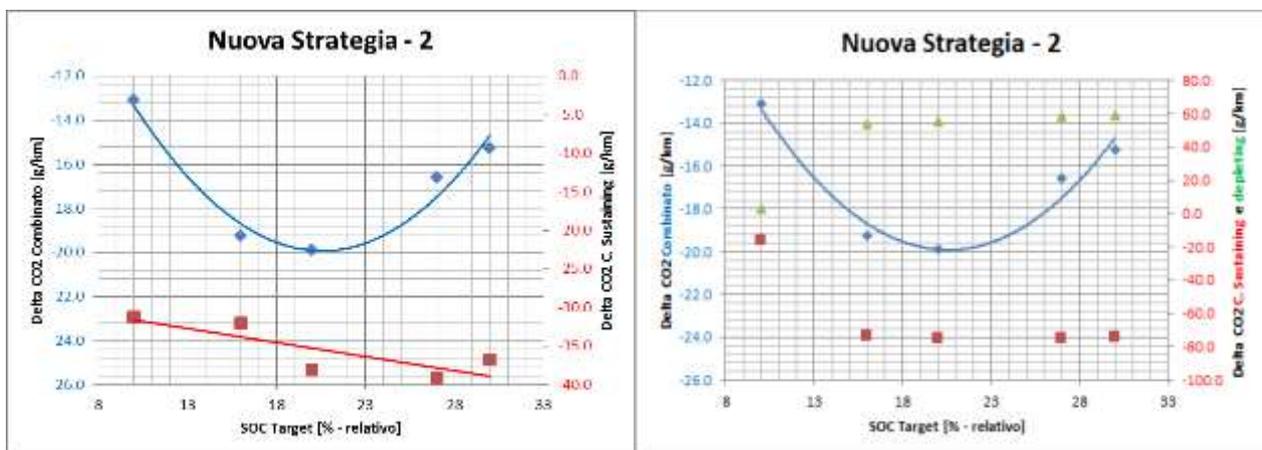


Figura 44 - Andamento dei consumi VF1 (depleting, sustaining e combinato) in funzione del SOC target (nuova strategia 2)

L’andamento dei consumi sul combinato ha un punto di minimo ottenuto utilizzando un SOC target pari al 20%, con una riduzione di circa -20 g/km; sul ciclo CS la riduzione di consumo è più marcata, circa pari a -38 g/km, dato che è stato incrementato il SOC ad inizio CS. Quindi la massimizzazione del HV SOC a fine ciclo CD e la massimizzazione della percentuale di eDrive su ciclo permettono di ridurre notevolmente i consumi, sia sul

singolo ciclo CS che sul ciclo CD, quindi sul combinato. Si evidenzia che aumentando il SOC target bisogna effettuare più cicli CD per soddisfare i limiti imposti dall'omologazione: nonostante la necessità di fare un ciclo CD in più, questa strategia rimane comunque più vantaggiosa dato che nel consumo combinato ne viene tenuto conto e risulta comunque più favorevole. Si evidenzia nella seguente immagine l'andamento dell'UF per il ciclo CD, utilizzato nella formula per il consumo combinato: questo è il motivo per cui non si ottengono svantaggi dovuti alla ripetizione del ciclo CD imposto dai vincoli omologativi.

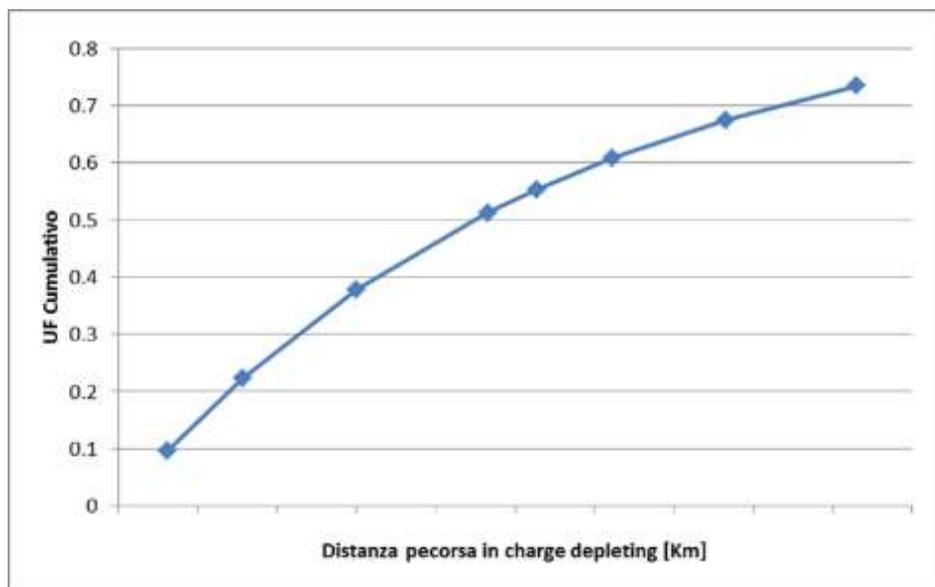


Figura 45 - UF cumulativo nel ciclo WLTC CD

Il calcolo dell'UF viene effettuato per ogni singola fase del ciclo, in modo cumulativo: nell'immagine si possono visualizzare otto fasi, corrispondenti quindi a due cicli CD. Quindi all'aumentare dell'UF il peso del consumo nei cicli CD sul combinato si riduce.

Andando ora a visualizzare i risultati sul ciclo CS si possono valutare le differenze tra la nuova strategia sviluppata e la strategia base.

Nel grafico raffigurante un ciclo WLTC CS sono stati plottati i seguenti dati su base temporale: la velocità di rotazione del motore endotermico, il SOC HV relativo, la coppia del ME P1, la coppia dell'ICE e la velocità lineare della vettura. Si sono sovrapposti i due andamenti, grafici blu per la calibrazione base e quelli rossi per la nuova strategia eDrive.

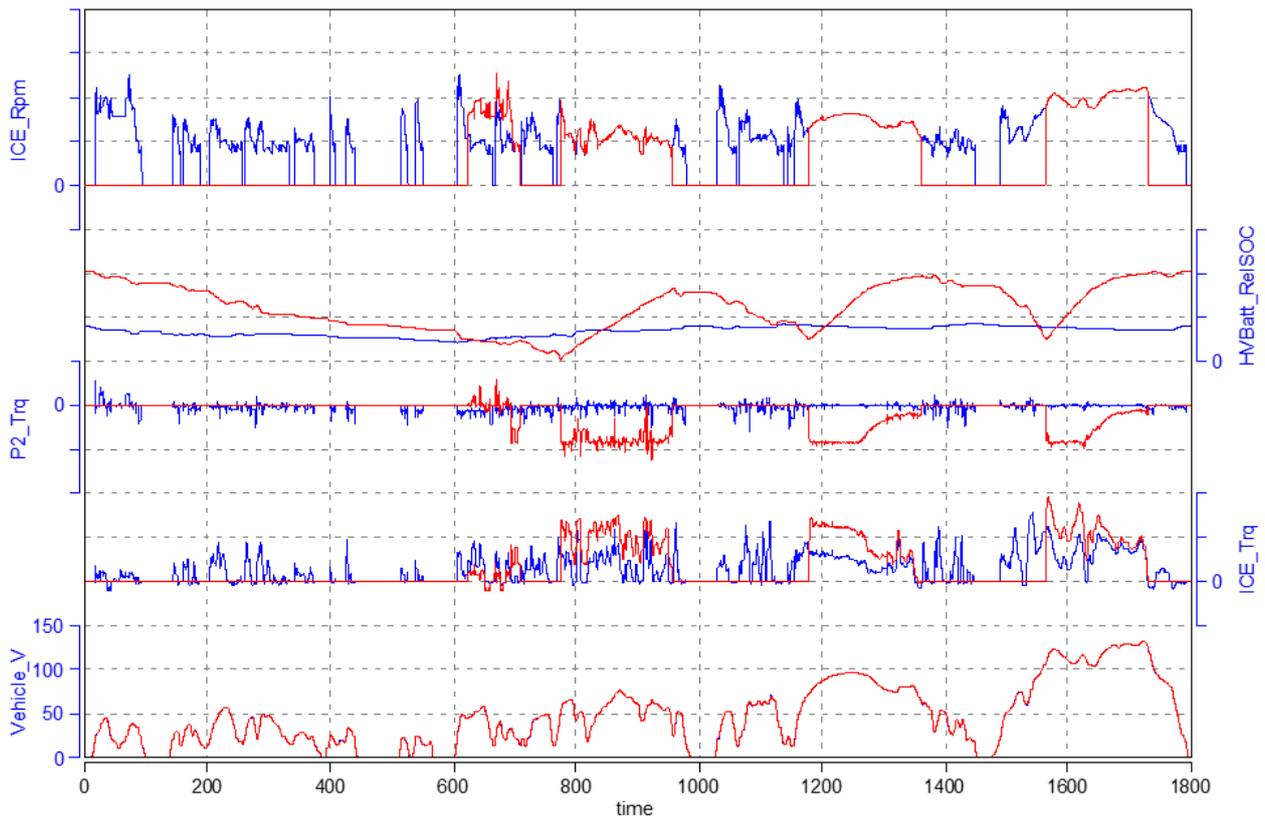


Figura 46 - VF1 WLTC CS (nuova strategia 2)

A differenza della calibrazione base che inizia il ciclo CS con un SOC basso (essendo SOC target pari al 5%) la nuova strategia consente di iniziare il ciclo CS con un SOC molto più alto permettendo una lunga fase di guida eDrive nella prima parte del ciclo (non possibile nella calibrazione base): questo implica una riduzione dei consumi dovuta ad un minore utilizzo dell'ICE (e quindi anche riduzione consumi grazie al minor consumo speso per le friction motore e pompaggio) e ad un utilizzo più efficiente dell'ICE. Si rileva inoltre una coppia LPM maggiorata nelle fasi a motore acceso, dovuta ad un SOC target più alto, con un conseguente aumento del carico motore.

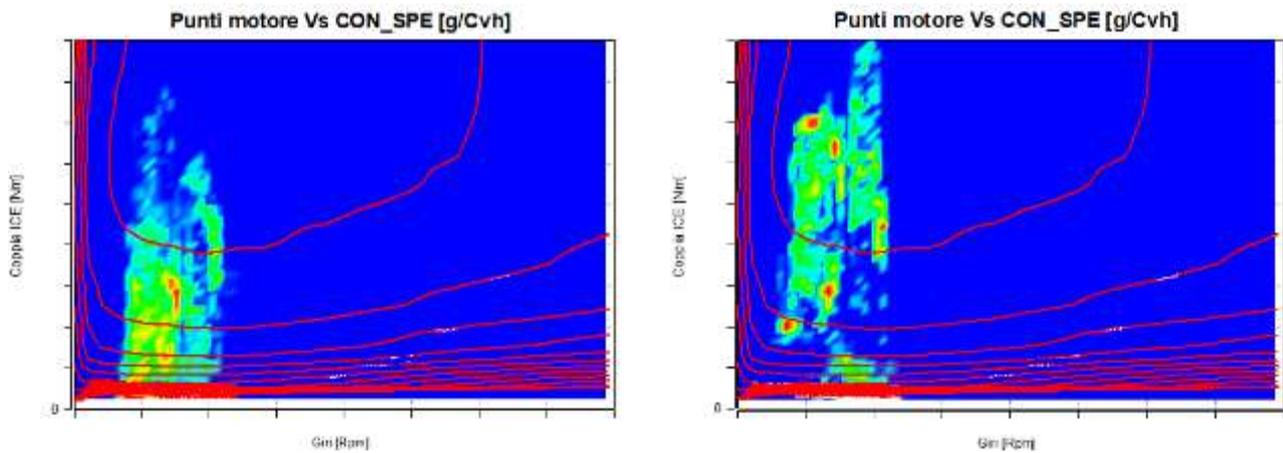


Figura 47 – Confronto punti motore vs consumo specifico VF1 tra strategia base e nuova strategia 2

In questi grafici è possibile fare un confronto dei punti motore tra la calibrazione base (grafico a sinistra) e la “nuova strategia 2” (grafico a destra). Le zone rosse sono punti nei quali è stato utilizzato l’ICE per maggior tempo e le linee rosse sono curve a stesso consumo specifico: emerge un sostanziale miglioramento dettato dal maggior utilizzo dell’ICE nella zona di massima efficienza e quindi a minimo consumo specifico. Questo significa maggior efficienza durante le fasi a motore acceso e maggior recupero di energia per la ricarica della batteria ad alta tensione che verrà poi utilizzata durante la guida puramente elettrica.

Oltre ai vantaggi riscontrati nel ciclo CS vado ora a valutare le differenze tra i cicli CD delle due strategie: la prima differenza sostanziale risiede nel fatto che per rispettare il vincolo di pari SOC ad inizio e a fine ciclo CS vi è la necessità di ripetere il ciclo CD per avere la giusta condizione di SOC ad inizio ciclo per poter completare il ciclo CS rispettando i vincoli omologativi. Si osserva inoltre che l’andamento del SOC è differente per i due casi: se nella calibrazione base una volta raggiunto il valore di HV SOC minimo, pari al valore di SOC target, si inizia a ricaricare la batteria fino a raggiungere il target per poi rimanere stabili a questo valore, con la nuova strategia di controllo si può notare un andamento oscillante centrato su un valore intermedio tra valore di SOC a bassa carica e SOC target.

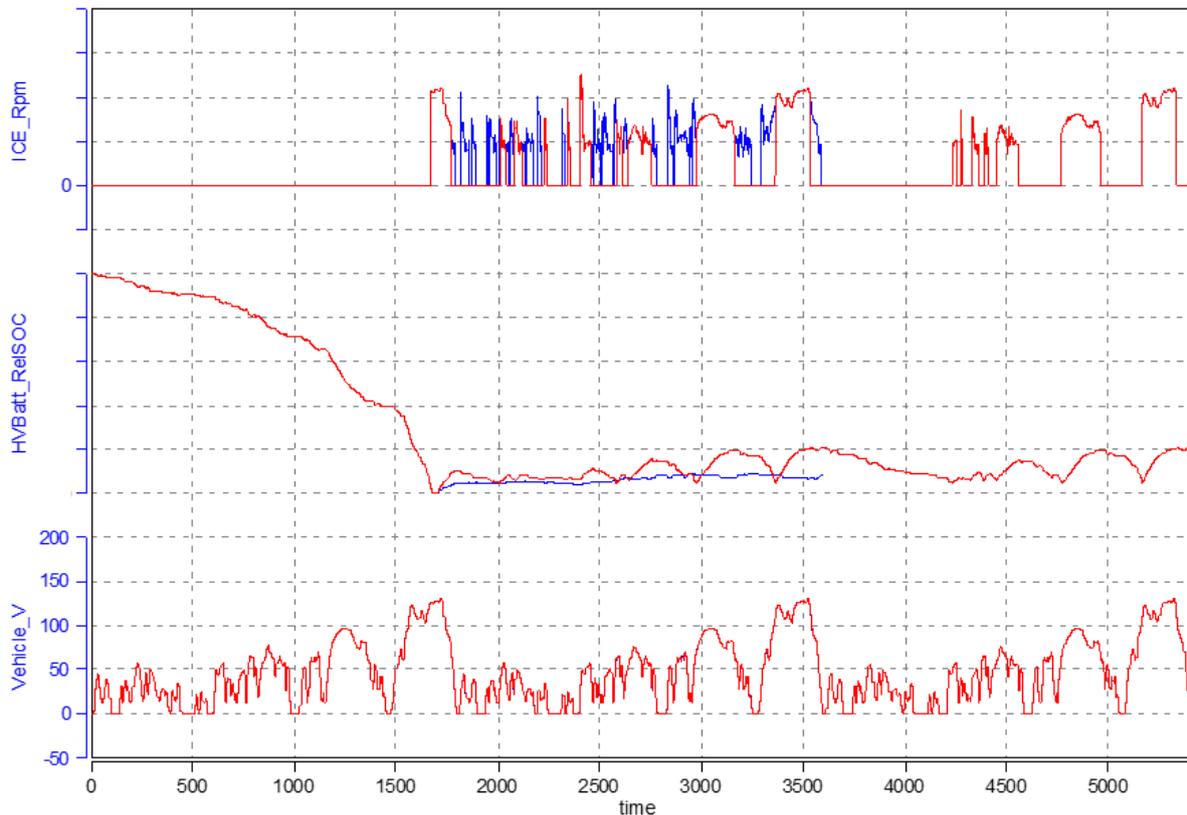


Figura 48 - VF1 WLTC CD - nuova strategia eDrive

I risultati ottenuti con questa nuova strategia sono chiaramente migliorativi dal punto di vista dei consumi tuttavia non basta per definire univocamente la strategia di controllo ottimale: è necessaria anche una valutazione di guidabilità dato che l'implementazione della nuova strategia potrebbe compromettere le performance del veicolo.

Sono state proposte le strategie per poter valutare il miglior compromesso tra guidabilità e riduzione consumi: ne è stata quindi definita una molto simile alla “nuova strategia 2” ma con calibrazioni leggermente differenti. Oltre a problemi riguardanti la guidabilità, bisogna tenere in considerazione che oltre alla procedura di omologazione WLTP bisogna testare ed utilizzare la stessa strategia anche per una procedura NEDC per poter definire il target di flotta per l'anno corrente, essendo richiesto dalla normativa (dato che siamo in un periodo di transizione tra le due procedure di omologazione).

Andiamo ora ad analizzare i risultati ottenuti sul modello VF2 utilizzando la stessa procedura utilizzata per la VF1.

3.3. VF2: nuova strategia eDrive

Utilizzando quindi gli stessi step di lavoro per l'ottimizzazione della strategia per la VF1 si valutano gli effetti che ha sulla VF2. Trasponendo la medesima strategia senza nessun tipo di ottimizzazione si può valutare se può essere migliorativa anche per la VF2.



Figura 49 - Andamento dei consumi VF2 su ciclo combinato e su ciclo sustaining in funzione del SOC target (nuova strategia 2)

Tramite i risultati ottenuti non si rilevano sostanziali miglioramenti di consumo; questo motivo è da associare alla catena sfavorevole di efficienze presente sulla VF2 già discusse in precedenza.

Sul ciclo CS non vi sono particolari riduzioni di consumo mentre sul consumo combinato si può notare un leggero aumento per tutte le prove effettuate: questo è dovuto al fatto che è necessario calibrare la nuova strategia sulla VF2, dato che era stata calibrata per un'altra vettura con differente architettura.

Non essendoci particolari benefici utilizzando la medesima strategia della VF1 si vuole agire sull'utilizzo della ME P2: aumentando il regime di utilizzo della macchina elettrica si aumenta l'efficienza di quest'ultima, essendo crescente con il regime di rotazione e decrescente con la coppia attuata (sia negativa che positiva). Si potrebbe così ipotizzare di ottenere un guadagno di consumo innalzando lo shift pattern (ovvero il regime di cambiata P2) durante l'eDrive.

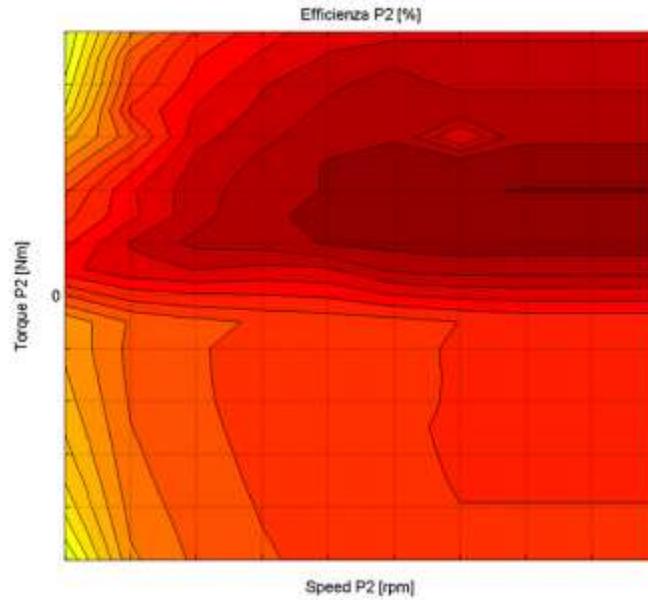


Figura 50 - Mappa di efficienza P2

È stata quindi definita una preselezione della marcia in guida eDrive, innalzando il regime di utilizzo del ME P2 per valutare se si possano ottenere guadagni dovuti ad una maggiore efficienza.

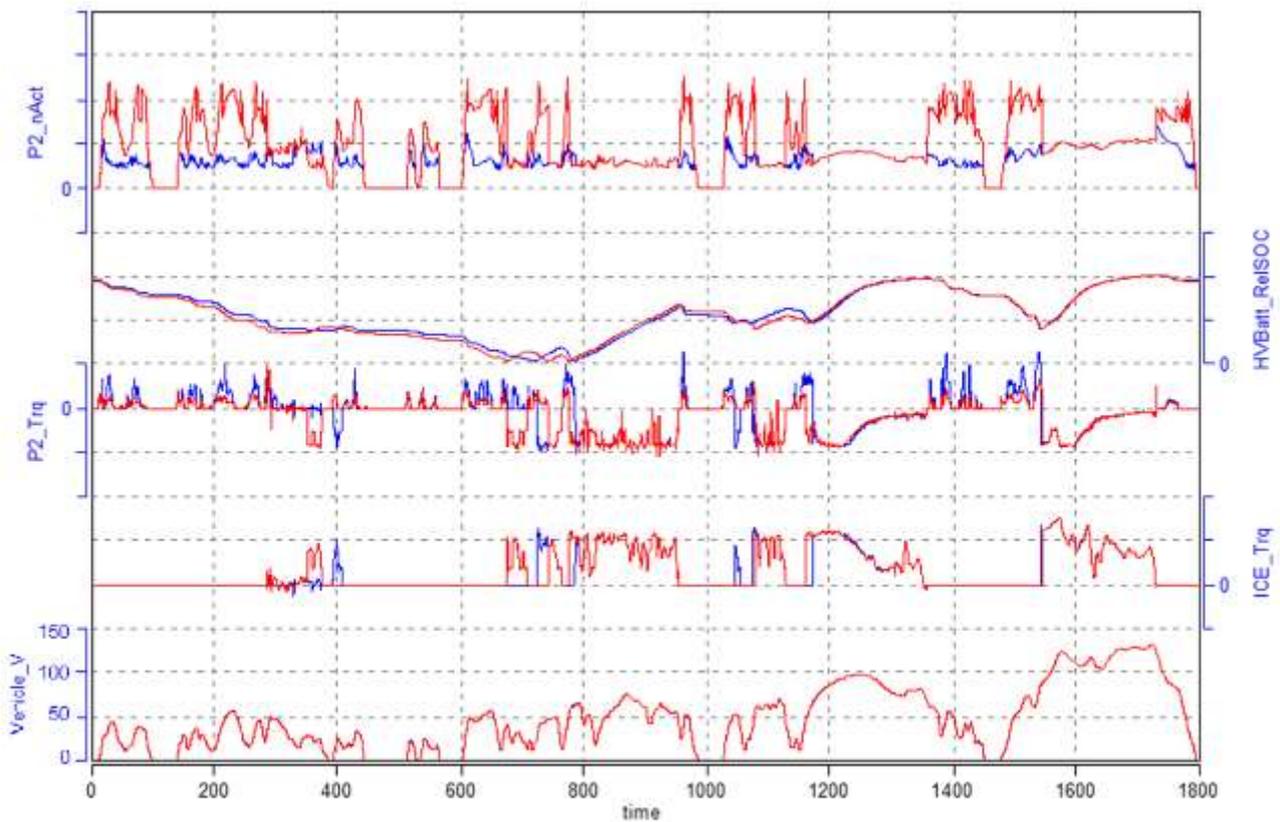


Figura 51 - VF2 WLTC CS (nuova strategia 2 + shift pattern rialzato)

Nel grafico l'andamento in blu è per la "nuova strategia 2" (calibrata per VF1) mentre quello rosso per la stessa strategia ma con innalzamento dello shift pattern in eDrive, ad un valore di regime di rientro pari a 4000 rpm. In realtà le prime simulazioni non mostrano particolari vantaggi di consumo dato che contemporaneamente si riduce l'efficienza del cambio, decrescente con i giri e crescente con la coppia: applicando sia la "nuova strategia 2" sia lo shift pattern eDrive rialzato sono aumentati i consumi sul ciclo CS, arrivando ad una differenza di +4.7 g/km rispetto alla calibrazione base. Quindi il regime di rientro utilizzato in questa simulazione si è rivelato troppo alto e per questo sfavorevole.

Nel grafico sottostante è rappresentato uno zoom del ciclo CS durante la guida eDrive. Si può notare una maggiore velocità di rotazione del P2 e una relativa diminuzione della coppia attuata. Viene riportato anche l'andamento dell'efficienza della trasmissione: è evidente una netta riduzione di efficienza dovuta all'innalzamento del regime di utilizzo del P2 e quindi della trasmissione, la quale ha un'efficienza decrescente con il regime.

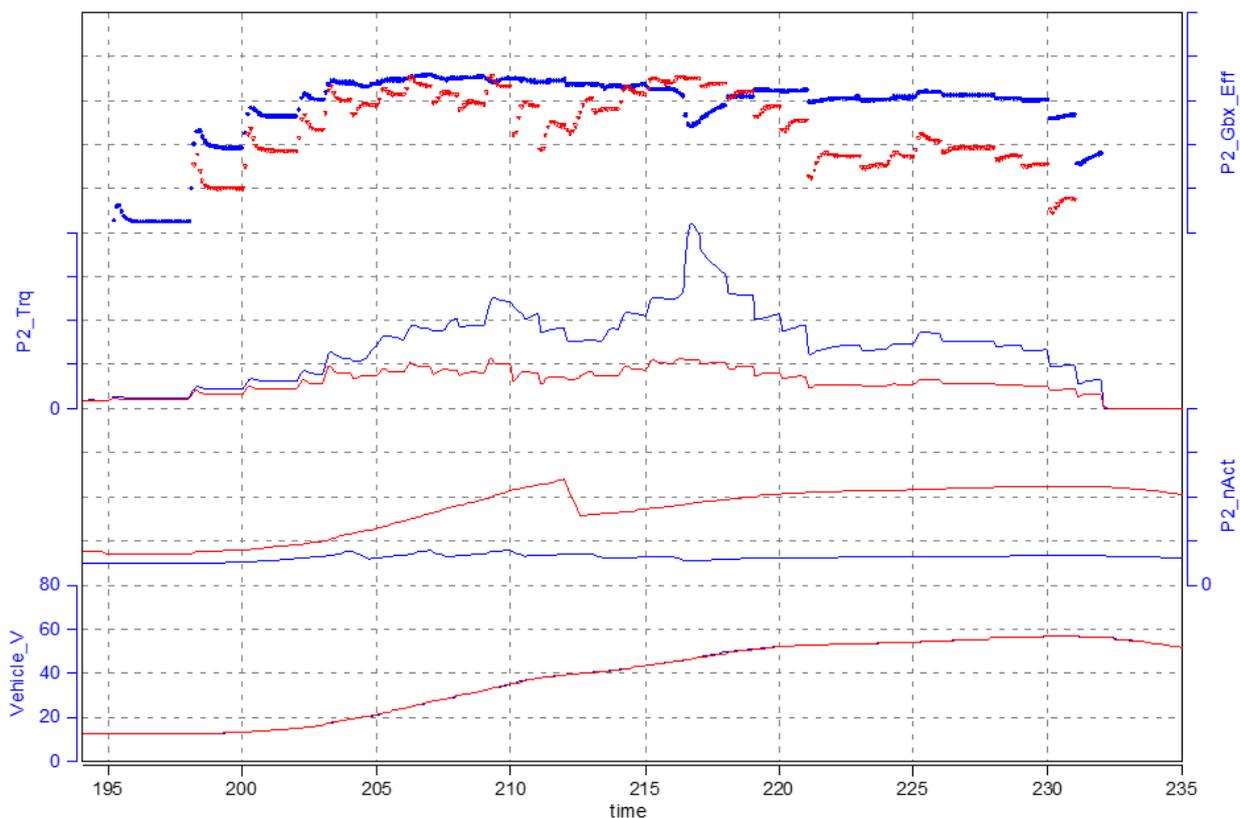


Figura 52 - VF2 zoom su ciclo WLTC CD (shift pattern rialzato)

L'innalzamento dello shift pattern al valore di rientro utilizzato non apporta benefici al sistema ma si può ritrovare un certo regime tale da aumentare maggiormente l'efficienza del P2 rispetto a quella del cambio. Posso andare a valutare se aumentando il regime di rientro durante l'eDrive riesco a risparmiare in termini di consumo: si sono svolte 5 diverse simulazioni con la strategia base a diverso regime di rientro e si è valutato l'andamento dei consumi e dell'electric range rispetto alla calibrazione base.

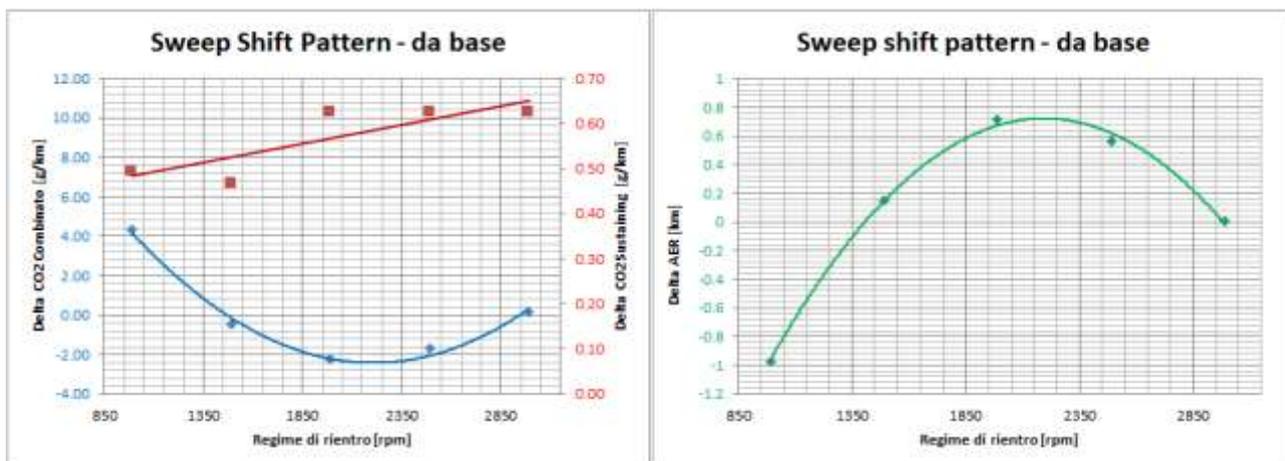


Figura 53 - Andamento consumi (CS e combinato) ed AER (all electric range) in funzione del regime di rientro

Si evidenzia un leggero aumento del consumo sul ciclo CS ed un andamento parabolico del consumo combinato che inverte la propria tendenza oltre un certo valore. Dal grafico a destra, dove viene illustrato l'andamento del range elettrico, si può notare un aumento di efficienza del sistema per valori di regime di rientro crescenti, per poi invertire la tendenza per valori oltre 2000 rpm; questo è il motivo del lieve risparmio ottenuto sul consumo combinato. Inoltre questo significa un minor utilizzo dell'ICE nel ciclo CD avendo aumentato il range elettrico.

Un innalzamento dello shift pattern non basta per ottenere benefici dal punto di vista dei consumi: si deve ottenere una mappa di cambiata che si basa sull'efficienza della catena ME P2 + trasmissione. Le mappe di efficienza della trasmissione sono di seguito riportate, una per ogni marcia.

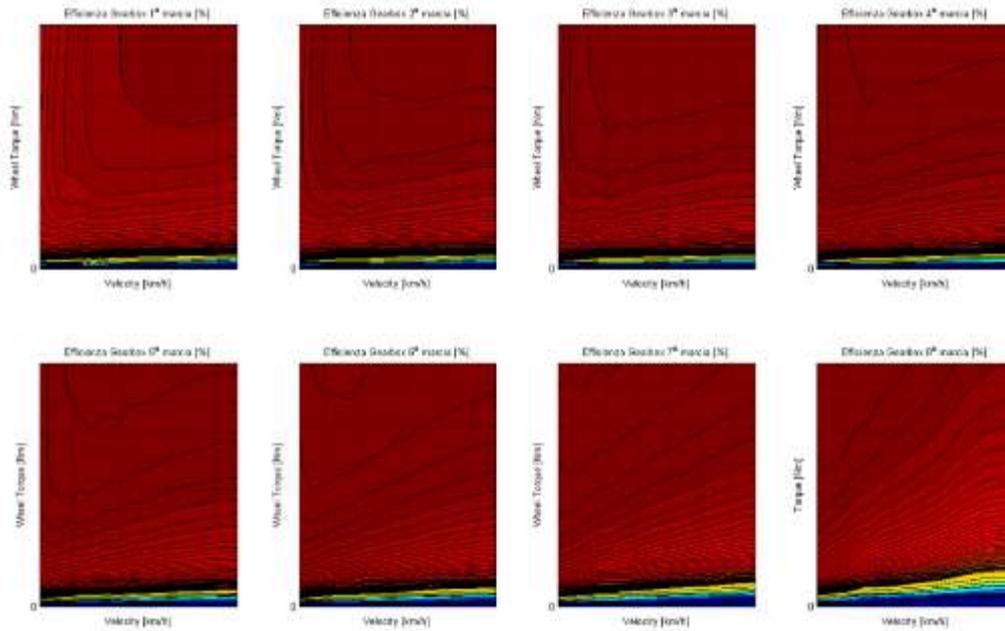


Figura 54 - Efficienza della trasmissione per ogni marcia

Si osserva che aumentando il regime di utilizzo, per un dato valore di coppia, l'efficienza ha un andamento monotono decrescente: più alta sarà la marcia e più alto sarà il gradiente di riduzione d'efficienza; questo è il motivo per cui non si ottengono benefici semplicemente innalzando i giri della macchina elettrica P2. Si vuole valutare se una mappa di cambiata ottimizzata in eDrive apporta benefici: si dovrebbero avere miglioramenti solamente durante la guida eDrive, quindi ci si aspetta una riduzione maggiore sul ciclo CD, essendo maggiore la distanza percorsa in modalità puramente elettrica, piuttosto che sul CS.

Di seguito vengono definiti i valori dei parametri utilizzati nella nuova strategia per VF2.

Tabella 7 - Calibrazioni "nuova strategia 2"

eDriveHVBattSupActvSOC [% abs]	25,4	Soglia di SOC per stato di carica alta
eDriveHVBattInfActvSOC [% abs]	21,4	Soglia di SOC per stato di carica bassa
eDriveEnOutCondSOC [-]	1	Bit per condizione accensione ICE su VStart
eDrivePedCondTime [s]	3	Tempo di rilascio pedale per rientro in eDrive
CoPOM_trqDesEIM_M [Nm]	max -120	Mappa di coppia LPM
EnEdrivePresel [-]	1	Bit per attivare preselezione marcia in eDrive
EnEdrivePresel_V [-]	1	Bit per mappa di cambiata funzione della velocità
CoPOM_rRelSOCDes_M [% rel]	Da ottimizzare	SOC target

Applicando la nuova strategia calibrata con shift pattern ottimizzato si possono analizzare i consumi risultanti dalle simulazioni, di seguito mostrati.

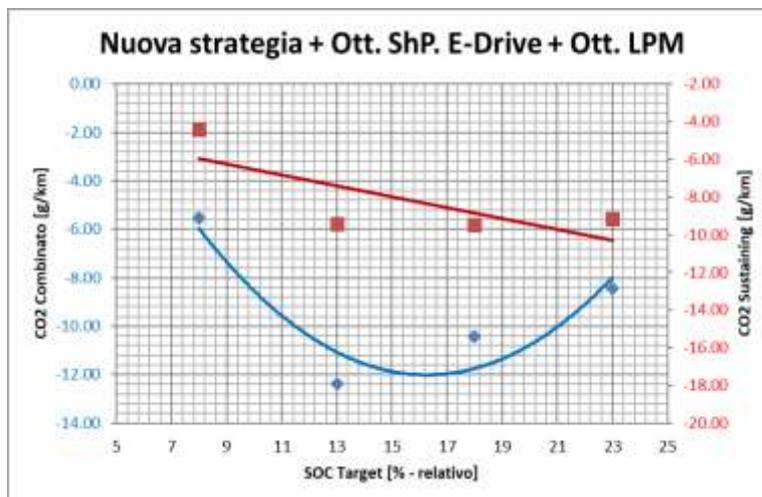


Figura 55 - Andamento dei consumi VF2 su ciclo combinato e su ciclo CS in funzione del SOC target (nuova strategia 2 ottimizzata)

Utilizzando la mappa di cambiata ottimizzata ed applicando la nuova strategia eDrive con una coppia LPM ottimizzata i risultati ottenuti sono migliorativi sia sul ciclo CS, con una riduzione pari a 9.4 g/km, che su ciclo combinato, pari a 12.6 g/km; inoltre è aumentata l'efficienza di utilizzo della carica in batteria dato che l'electric range è aumentato di circa 1km (sul ciclo CD).

Nel seguente grafico si mostrano i risultati della simulazione effettuata applicando la nuova strategia calibrata e la nuova mappa di cambiata ottimizzata, basata sull'efficienza. Vengono mostrati i giri della macchina elettrica P2, il SOC relativo (diverse scale nei due grafici), le tracce di coppia del ME P2 e dell'ICE e la velocità vettura.

Nel ciclo CD, come ci si aspettava, si può notare un maggior range di guida in elettrico partendo dallo stesso SOC iniziale: questo implica maggior efficienza in guida eDrive data dall'utilizzo più efficiente del ME P2 e della trasmissione. Si evidenzia un regime di utilizzo del P2 maggiorato e una conseguente riduzione della coppia attuata in fase eDrive. Nelle fasi a motore acceso invece si evidenzia un maggior apporto rigenerativo del motore elettrico P2: la coppia LPM è stata ottimizzata con conseguenti benefici sull'efficienza dell'ICE e quindi sul consumo.

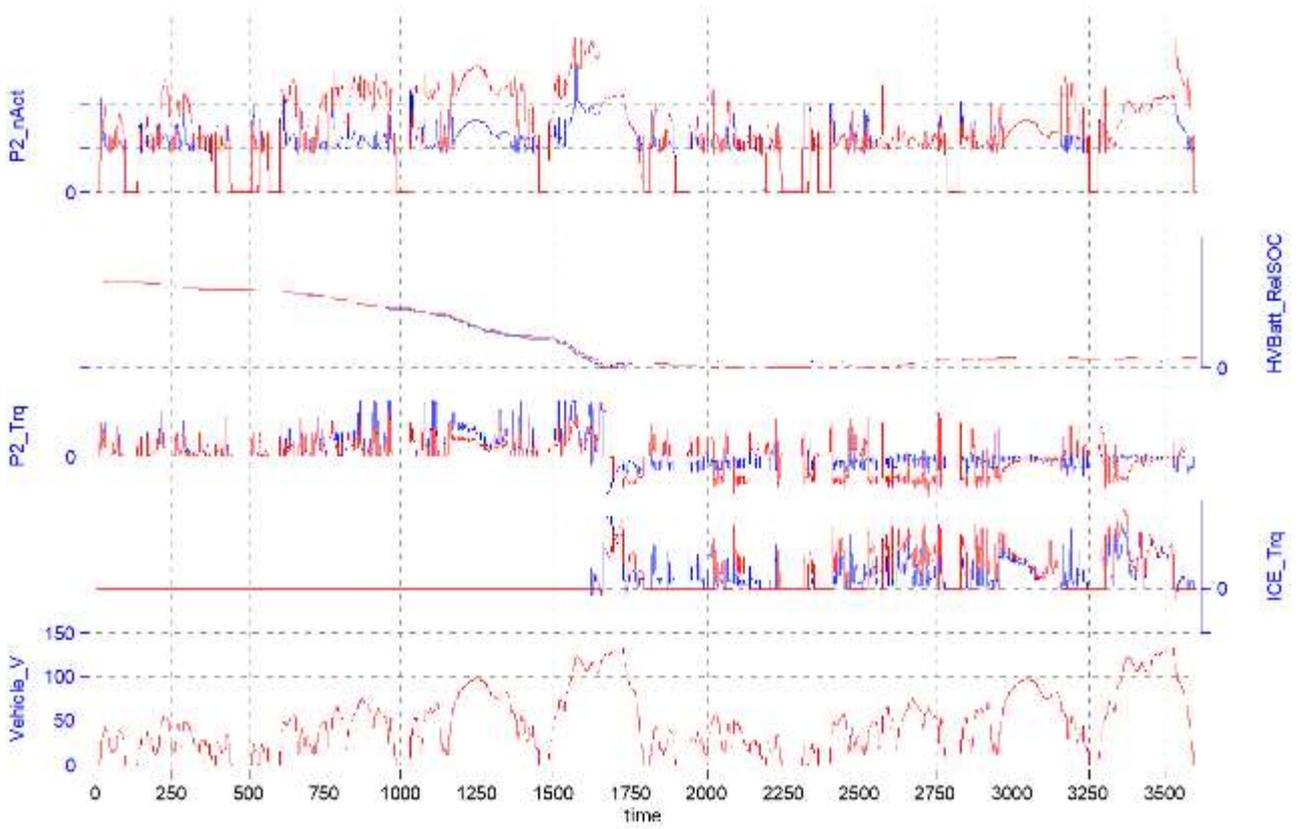


Figura 56 - VF2 WLTC CD - nuova strategia 2 + Shift Pattern e LPM ottimizzati



Figura 57 - VF2 WLTC CS - nuova strategia 2 + Shift Pattern e LPM ottimizzati

I risultati ottenuti mostrano che una mappa di cambiata basata solamente su un regime di rientro innalzato non permette di ottenere gli stessi benefici che si avrebbero utilizzando una mappa di cambiata ottimizzata: dal punto di vista della guidabilità però una mappa di cambiata basata su un regime di rientro innalzato, costante per tutte le marce, risulterebbe preferibile rispetto ad una mappa basata puramente sull'efficienza. Applicando poi le stesse modifiche della VF1 alle condizioni che regolano l'ingresso e l'uscita da eDrive con la nuova mappa di cambiata ottimizzata si sono ridotti notevolmente i consumi e quindi le emissioni. Ovviamente non è stato possibile ottenere gli stessi benefici ottenuti per la VF1 data la differente architettura delle due vetture. Risulta comunque un buon risultato avendo ridotto i consumi e le emissioni su ciclo e aumentato il range elettrico.

4. Analisi energetica

Finora si è cercato di ottimizzare e calibrare la strategia di controllo per ottenere un consumo totale su ciclo minimo. In questo capitolo si vogliono analizzare i risultati delle simulazioni effettuando una divisione dei consumi per analizzare singolarmente tutti i contributi: in questo modo è possibile capire a quali fattori è attribuibile una certa riduzione di consumo e quantificare i benefici delle singole strategie.

4.1. Tool di post-processing per confronto simulazioni

Per poter analizzare le simulazioni effettuate nella prima parte dell'elaborato è stato necessario lo sviluppo di un tool di post processing nell'ambiente Matlab in grado di importare acquisizioni da modello Simulink, da banco prova e da vettura. In questo modo è possibile confrontare in modo diretto le varie prove e, grazie all'utilizzo di librerie Python, il caricamento delle acquisizioni risulta molto veloce. Questo tool permette inoltre di allineare automaticamente le tracce di velocità, Inca e modale, in modo da sovrapporre le due e poter quindi allineare tutti i canali presenti in quell'acquisizione, traslandoli sull'asse tempo della stessa quantità.

In caso di acquisizioni Inca e modale il tool è in grado di esportare un unico file *mdf* contenente tutti i canali presenti nelle due acquisizioni, allineati tra loro: nel file esportato si troveranno sia tutti i canali provenienti da ECU (giri motore, attuazioni, ecc.), sia quelli provenienti da modale (emissioni, ecc.) con le stesse caratteristiche di campionamento (non vengono re-interpolati all'interno del tool ma viene modificato semplicemente il vettore tempo per ognuno di questi canali) in modo da poterlo utilizzare in altri programmi di visualizzazione dati (come ad esempio Concerto). È inoltre possibile salvare la configurazione (l'insieme di tutte le acquisizioni importate) in un unico file *.mat in modo da poter poi caricare la stessa in un'altra sessione.



Figura 58 - Tool post processing "EmiPostPro"

Il tool presenta diverse pagine con molteplici funzioni. Nella pagina principale si possono importare le diverse acquisizioni, le quali verranno poi analizzate nelle pagine seguenti. Si può caricare il file dei parametri della vettura, dove sono presenti tutti i piani quotati e le calibrazioni, che verranno utilizzati per il calcolo dell'energia combustibile di cui si parlerà in seguito. Nella finestra principale è possibile attribuire ad ogni canale importato nel tool il relativo alias con il quale è chiamato all'interno dell'acquisizione: in questo modo il tool associa il canale dell'acquisizione al relativo canale interno che presenta tra gli aliases questo nome. È presente anche una pagina per l'allineamento manuale delle acquisizioni sulla base della traccia di velocità (prendendo come riferimento una tra quelle importate) ed un'altra pagina nella quale si possono allineare i canali di emissioni per ogni specie con i giri motore. Nella seguente trattazione verrà utilizzata principalmente la pagina di "split consumi" tramite la quale per ogni acquisizione è possibile analizzare ogni singolo contributo energetico. Il tool presenta inoltre una pagina di visualizzazione dei canali, sia quelli importati che ricalcolati all'interno del tool (come ad esempio l'andamento dei vari contributi energetici), con la possibilità di utilizzare diversi assi delle ordinate per una migliore visualizzazione.

La divisione energetica che viene effettuata dal tool si basa essenzialmente sullo split di coppia indicata: conoscendo la coppia indicata e tutti i contributi che vanno a formarla si può calcolare la potenza meccanica utilizzata step-by-step; integrando poi queste potenze sull'intero ciclo si trova l'energia meccanica dei singoli contributi e quindi quella totale. Il consumo istantaneo del motore endotermico è direttamente proporzionale alla IMEPH-base: questo è il motivo per cui si vuole dividere l'energia utilizzata nei vari contributi che vanno a formare la IMEPH-base. La IMEPH-base è la IMEPH comprensiva

delle riserve di coppia (dovute ad esempio al catalyst heating, al rilascio pedale, ecc.): la centralina richiede una certa riserva di coppia al motore che viene ricavata confrontando tutte le richieste di riserva di coppia (prendendo il massimo valore tra queste); questo implica un'ulteriore complessità nel calcolo dei consumi.

La IMEPH è dunque composta dai seguenti contributi:

- IMEP (*Indicated Mean Effective Pressure*): contributo utile speso per l'avanzamento e anche per le friction cambio;
- PMEP (*Pumping Mean Effective Pressure*): contributo speso per pompaggio;
- FMEP (*Friction Mean Effective Pressure*) o PMF: contributo speso per attriti interni al motore.

Si ottiene quindi uno split energetico, ricavato dai valori di coppia istantanea, tramite il quale posso ritrovare il consumo di ogni contributo. È importante inoltre considerare un consumo nullo durante le fasi di cut-off del motore, quindi tramite il bit che indica l'attuazione del cut-off posso ottenere il consumo energetico effettivo. Anche il bit che indica l'apertura della frizione viene utilizzato per azzerare la potenza che il motore utilizza dovuta dalla coppia di propulsione e quella attuata dai motori elettrici P4 sull'assale frontale. In questo modo durante le fasi a frizione aperta viene considerata solo la potenza effettiva sviluppata dal motore. Lo split di energia viene valutato solo a motore acceso dato che il consumo di carburante è dovuto solo ad esso (tramite il bit di accensione motore individuo quando il motore è acceso): non è quindi un bilancio energetico totale ma solamente una divisione dell'energia utilizzata a motore acceso. Inoltre per ricavare l'energia persa per riserva di coppia, divisa tra KH e guidabilità, viene utilizzato il bit di KH.

I canali di potenza che sono necessari per il calcolo dell'energia totale sono ricavati da tutti i contributi di coppia che vanno a sommarsi per ricreare la coppia totale alle ruote. Per l'analisi di divisione dell'energia vengono utilizzati i seguenti valori di coppie istantanee le quali, sommate assieme, eguagliano la coppia "IMEPH-base":

- *Coppia di propulsione (uscita cambio)*: è la coppia richiesta alle ruote dal driver;
- *Coppia persa per pompaggio*: è la coppia che si perde per il pompaggio dell'ICE;

- *Coppia persa per attriti motore*: è la coppia che si va a perdere negli attriti del motore, a freddo e a caldo;
- *Coppia persa per attriti nella trasmissione*;
- *Coppia P2*: è la coppia attuata dal ME P2 quindi comprensiva della coppia di recupero di energia in batteria (coppia LPM) e della coppia erogata dal P2, come ad esempio coppia di fill-up per compensare il turbo-lag;
- *Riserva di coppia KH*: è la riserva di coppia, garantita attuando una riduzione di anticipo, utilizzata durante il riscaldamento del catalizzatore (catalyst heating KH) ad inizio ciclo (cold start): ritardando l'anticipo si hanno temperature di scarico più alte ed in questo modo è possibile portare a temperatura il catalizzatore più rapidamente ed arrivare quindi al target nel più breve tempo possibile;
- *Riserva di coppia guidabilità*: è la riserva di coppia, garantita attuando una riduzione di anticipo, utilizzata per ragioni di guidabilità (ad esempio quando viene rilasciato il pedale si riduce l'anticipo per aumentare il freno motore dell'ICE).

La somma algebrica di questi contributi va a definire la coppia "IMEPH-base". Non viene riportato nello split la coppia attuata dai ME P4 sull'assale frontale: vengono utilizzati principalmente per la guida eDrive (a frizione aperta) e per recuperare energia durante la frenata rigenerativa, quindi si può considerare praticamente nullo il loro contributo propulsivo a motore acceso.

Si esegue poi un'ulteriore divisione dell'energia rigenerata dal motore elettrico P2 dove, tramite il flusso di correnti al convertitore DCDC, si può andare a dividere in modo proporzionale l'energia recuperata da P2. Si divide il contributo energetico di P2 nelle seguenti parti:

- *Ricarica batteria LV*: energia utilizzata per la ricarica della batteria a basso voltaggio;
- *Ricarica batteria HV*: energia utilizzata per la ricarica della batteria ad alto voltaggio;
- *Ausiliari LV*: energia utilizzata per gli ausiliari a basso voltaggio;
- *Ausiliari HV*: energia utilizzata per gli ausiliari ad alto voltaggio;

- *Contributo elettrico P4 (sinistro e destro):* è l'energia recuperata dai ME P4 e risulta principalmente un contributo rigenerativo.

Il tool di divisione consumi permette inoltre di calcolare l'energia fornita dal combustibile tramite la portata di combustibile. Questa non è misurabile direttamente in vettura ma è stimata in catena aperta tramite piano quotato di consumo orario. In banco prova invece la portata combustibile viene misurata tramite un apposito sistema quindi per il calcolo dell'energia combustibile viene utilizzato dal tool direttamente il canale presente nell'acquisizione modale del banco per ottenere una maggiore precisione. Conoscendo dunque la portata, il potere calorifero LHV e il rendimento di combustione (anche questo ottenuto tramite piano quotato) si può andare a calcolare la potenza istantanea del combustibile e quindi, integrandola, l'energia fornita dal combustibile. Avendo moltiplicato per il rendimento di combustione questa energia in realtà si può considerare energia meccanica derivante dall'energia chimica del combustibile.

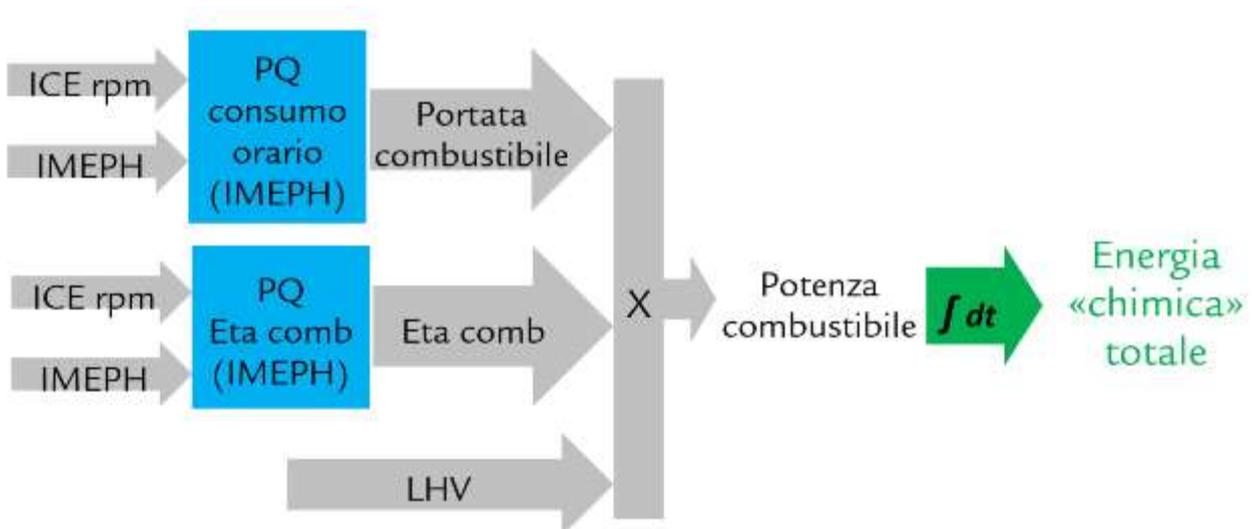


Figura 59 - Calcolo energia da piano quotato di consumo orario e di rendimento di combustione

In questo modo è possibile ottenere un confronto tra l'energia meccanica totale ricavata dallo split di coppia e l'energia meccanica fornita dal combustibile: le due energie devono essere confrontabili dato che l'energia meccanica deriva dall'energia del combustibile a meno delle perdite nella conversione; nel caso in cui non lo fossero significherebbe che nel calcolo dell'energia non è stato valutato qualche contributo importante.



Figura 60 - Confronto energia meccanica ed energia " chimica"

Nel grafico vengono mostrati a titolo esemplificativo i risultati dello split energetico delle simulazioni con la “nuova strategia 1” (ciclo CS): in blu il totale dell’energia meccanica (somma di tutti i contributi calcolati dallo split di coppia) e in arancione l’energia chimica (dalla portata di combustibile ricavata dal piano quotato), riportata in energia meccanica tramite il rendimento di combustione. Si può notare una leggera differenza tra le due energie dovuta principalmente ad errori numerici introdotti dalla re-interpolazione dei piani quotati: tale differenza è inferiore allo 0,5% e risulta dunque un risultato accettabile.

Nella tabella vengono espressi i canali utilizzati dal tool nella divisione energetica per ogni singolo contributo e per ogni tipo di acquisizione (simulazione, banco prova, vettura).

Tabella 8 - Contributi per split energetico

		Modello Forward	Banco prova	Vettura
ENERGIA MECCANICA	Coppia friction cambio	Da PQ (modello ICE)	Canale centralina (stimata da PQ)	Coppia_PT - Coppia_ruote_clutch
	Coppia PMF + PMEP	Da PQ (modello ICE)	Canale centralina (stimata da PQ)	Canale centralina (stima da PQ)
	Coppia di propulsione	Da modello ICE	Misurata da freno	Coppia_PT - Coppia_friction_cambio
	Coppia ME P2	Da modello P2	Da canali misurati di corrente e voltaggio	Da canali misurati di corrente e voltaggio
	Riserva di coppia KH	Da modello ICE	$(Coppia_ICE_aria_anticipo_base - Coppia_ICE) * B_KH$	$(Coppia_ICE_aria_anticipo_base - Coppia_ICE) * B_KH$
	Riserva di coppia guidabilità	Da modello ICE	$(Coppia_ICE_aria_anticipo_base - Coppia_ICE) * (1 - B_KH)$	$(Coppia_ICE_aria_anticipo_base - Coppia_ICE) * (1 - B_KH)$
EN. COMB.	Portata combustibile	Da PQ (modello ICE)	Misurata	Da PQ
	Rendimento di combustione	Da PQ (modello ICE)	Da PQ	Da PQ

Le riserve di coppia non sono misurate direttamente ma vengono stimate dal modello di torque della ECU, considerando la differenza tra la coppia aria ad anticipo base e la

coppia effettivamente erogata dall'ICE: questa indica la riserva di coppia che il motore sta attuando e, in base al bit di catalyst heating, si può dividere in riserva di coppia per KH e per guidabilità.

Verranno di seguito mostrati i risultati ottenuti tramite il tool, analizzando la divisione energetica delle varie simulazioni effettuate per le diverse strategie.

4.2. Split consumi VF1

Su VF1 la coppia di propulsione ICE + P1 riportata a livello delle ruote non corrisponde alla coppia totale dato che bisogna considerare anche il contributo dei P4: questo però non viene riportato nello split di coppia visto che viene considerata solo la coppia uscita cambio e non la coppia alle ruote.

Per confrontare i cicli CD vi è la necessità di utilizzare un fattore di correzione in quelle simulazioni dove è stato necessario più di un ciclo CD per soddisfare i vincoli omologativi; quindi bisognerebbe correggere i valori di energia prima di poter effettuare un confronto: per questo motivo non viene riportata la divisione energetica per i cicli CD ma solamente per i cicli CS, essendo di difficile interpretazione l'analisi delle prove con differenti cicli CD.

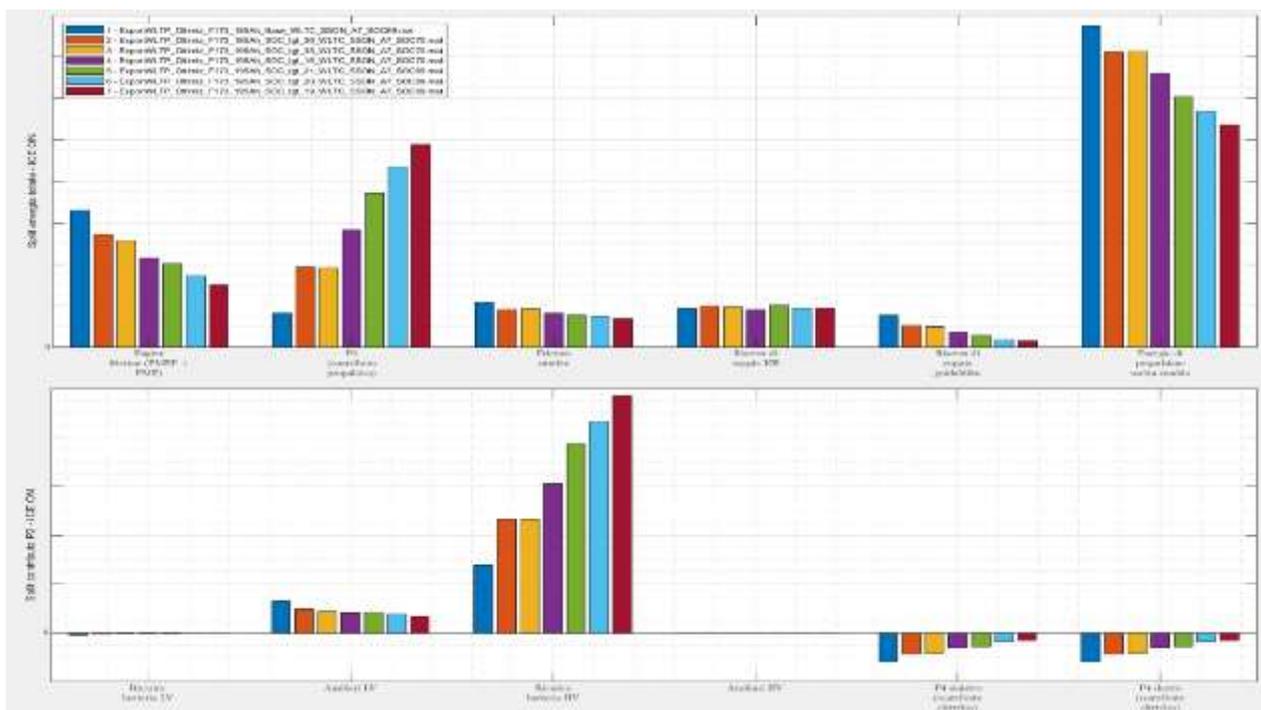


Figura 61 - Split consumi VF1 ciclo CS - Nuova strategia 1

Le varie simulazioni sono state ordinate in funzione del SOC HV a fine ciclo CD (o inizio ciclo CS). Il grafico risulta abbastanza auto esplicativo: si può notare che con l'aumento del SOC target si ha un relativo aumento del contributo di P1 quindi un maggior recupero di energia dovuta a coppia LPM più elevata con una conseguente riduzione delle perdite per attrito e pompaggio, che implica un minor tempo di utilizzo dell'ICE. Questo corrisponde ad un calo progressivo della coppia di propulsione (uscita cambio) dato che, avendo ricaricato maggiormente la batteria, si possono utilizzare i motori elettrici sugli assali per sviluppare coppia propulsiva e guidare in modalità completamente elettrica. Per la “nuova strategia 1” il confronto risulta di facile interpretazione dato che è stato solamente massimizzato il SOC a fine ciclo CD senza modifiche lato guidabilità.

Confrontando il trend del consumo nei cicli CS (punti rossi del grafico a destra) calcolato in simulazione con il trend dell'energia totale ricavata dallo split energetico è possibile notare lo stesso andamento qualitativo: si può quindi validare il tool di split consumi per il modello Simulink, risultando pertanto una prima validazione “offline”.

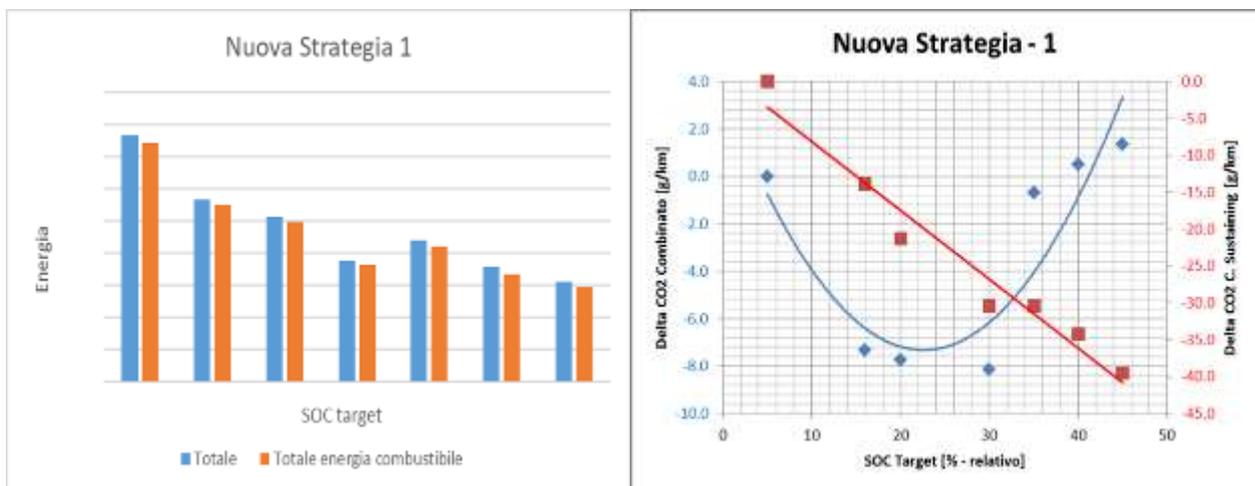


Figura 62 - Confronto energia totale ed energia combustibile

Andiamo ad esaminare lo split energetico per la “nuova strategia 2”: come per la strategia precedentemente analizzata anche in questo caso lo split energetico sul ciclo CD non dà informazioni significative dato che per alcune simulazioni sono stati necessari più cicli, pertanto verrà illustrata solo la divisione energetica sul ciclo CS.

Anche in questo caso sono state ordinate le simulazioni in funzione del SOC HV ad inizio ciclo CS. Viene riportata anche la simulazione effettuata con la strategia base (in blu) per esaminare la differenza con la nuova strategia sviluppata.

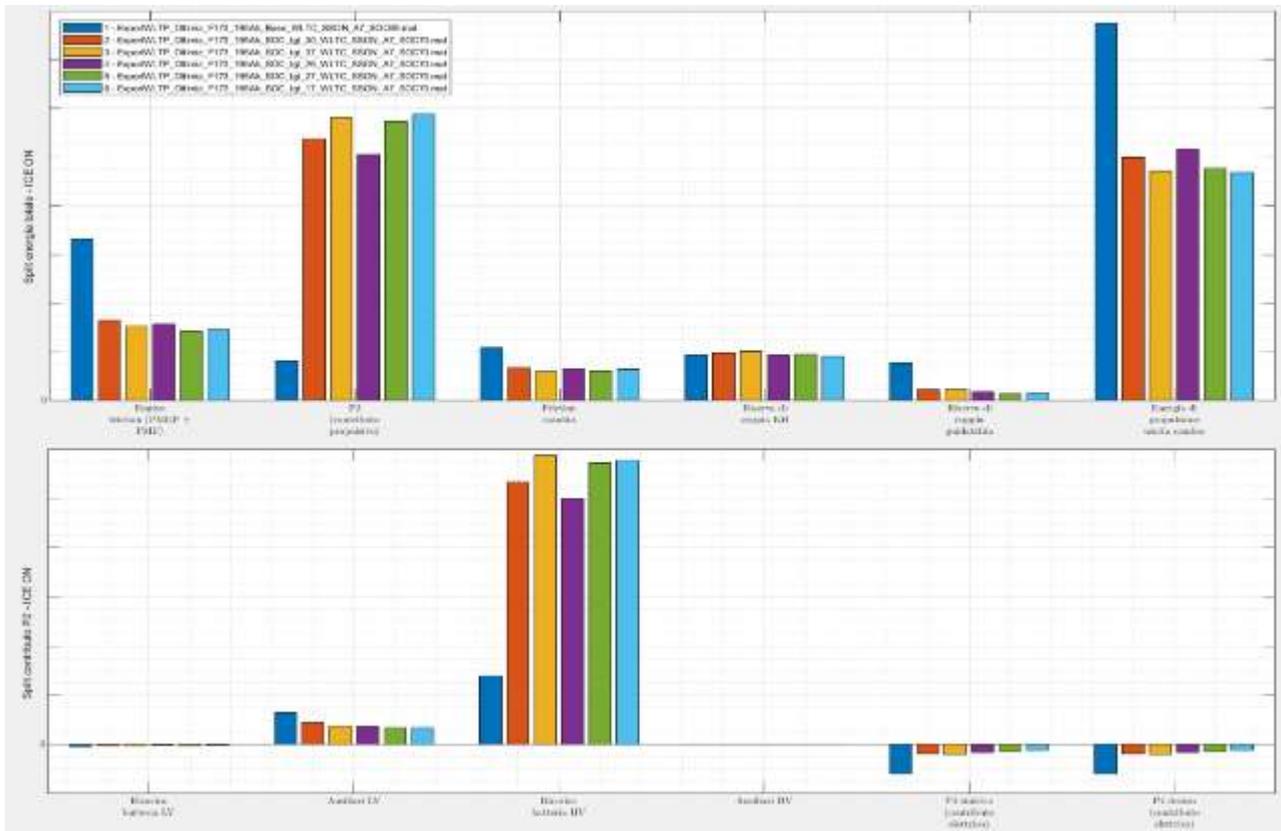


Figura 63 - Split consumi VF1 ciclo CS - Nuova strategia 2

Risulta in maniera immediata quali contributi abbiano portato a benefici sul consumo rispetto alla strategia base: è evidente il maggior recupero di energia tramite ME P1 (pari a circa quattro volte rispetto alla strategia base) e la conseguente riduzione dell'energia di propulsione uscita cambio (ridotta circa del 40%). Questo significa una maggiore distanza percorsa su ciclo in modalità puramente elettrica e quindi un minor tempo a motore acceso. Il minor utilizzo dell'ICE durante il ciclo implica una minor perdita dovuta ad attriti e pompaggio (ridotta mediamente del 50%) e per riserve di coppia: l'energia dovuta alla riserva di coppia per guidabilità è calata mentre quella per KH risulta comunque molto simile, dato che alla prima accensione il motore va in catalyst heating e non si rientra in eDrive fino al completamento del KH.

Questa nuova strategia risulta pertanto molto vantaggiosa in un'ottica di riduzione consumi dato che permette di ridurre le perdite legate al motore endotermico (pompaggio

e friction) che si avrebbero sul ciclo e allo stesso tempo di aumentare l'efficienza totale del sistema ibrido: è una strategia di controllo che predilige l'utilizzo dell'energia per i motori elettrici P4 sull'assale anteriore limitando quindi l'utilizzo dell'ICE.

4.3. Split consumi VF2

Su VF2 non sono presenti i ME P4 sull'assale anteriore: questo significa che la coppia di propulsione in uscita dalla trasmissione è comprensiva di tutti i contributi di coppia. Inoltre, essendo VF2 sprovvisto dei motori elettrici P4 sull'assale frontale, il contributo propulsivo di P2 sarà maggiore rispetto alla VF1 dato che viene utilizzato anche durante la guida eDrive (non si evidenzia dallo split energetico essendo solo a motore acceso).

Nell'immagine si può visualizzare la divisione energetica della nuova strategia applicata alla VF2 senza alcuna ottimizzazione.

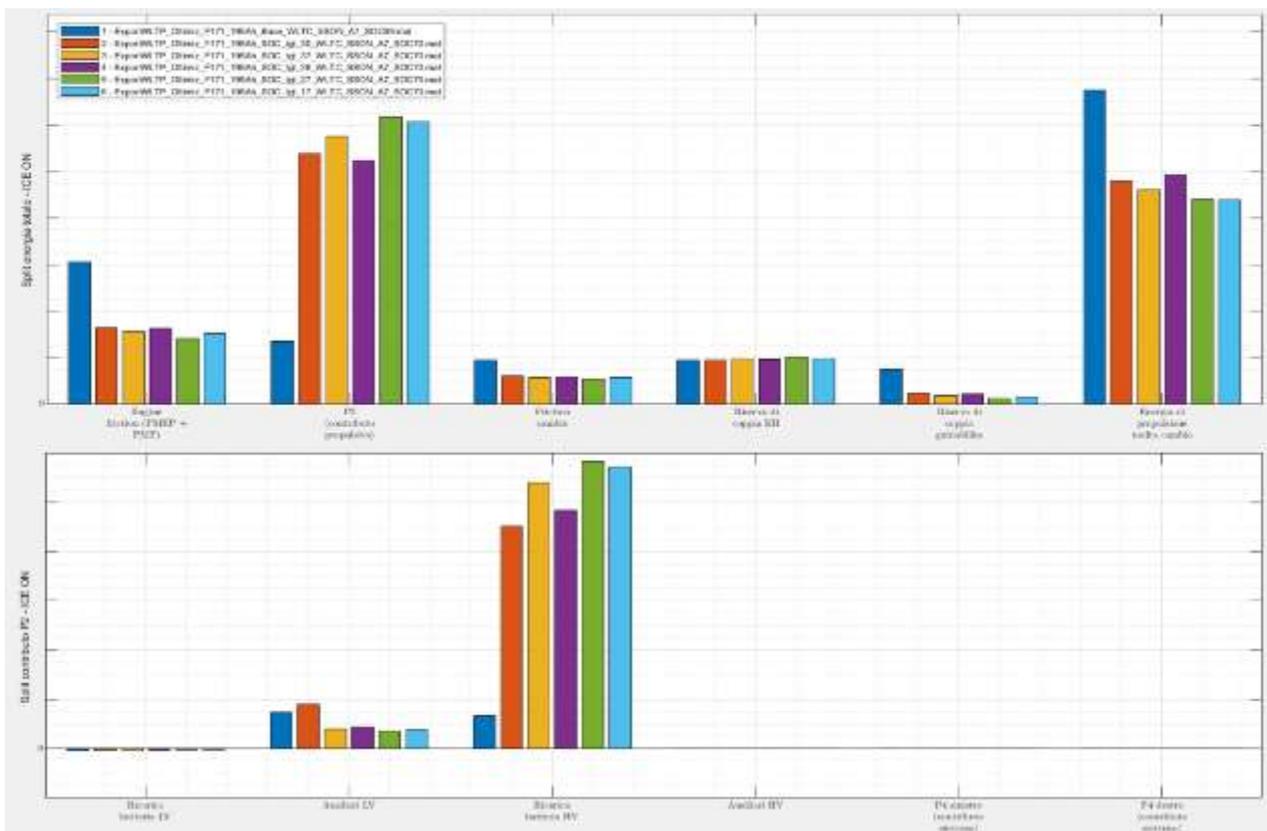


Figura 64 - Split consumi VF2 ciclo CS - Nuova strategia 2

Rispetto alla strategia base (in blu) si nota un notevole incremento dell'utilizzo del ME P2 a motore acceso, quindi una maggior energia per ricaricare la batteria ad alta tensione

(aumentata di quasi sette volte): questo è dovuto ad una coppia LPM molto elevata. Tuttavia l'energia recuperata tramite coppia LPM viene utilizzata, a differenza della VF1, dal motore elettrico P2: questo implica una minor efficienza complessiva del sistema ibrido, il che giustifica il leggero aumento dei consumi trasponendo la stessa strategia su VF2. Trasporre la “nuova strategia 2” alla VF2 senza alcuna ottimizzazione, dunque, non permette di ottenere benefici per i problemi già esposti in precedenza: la differente architettura non consente di guadagnare in termini di consumo dato che vi è la necessità di ottimizzare il sistema e effettuare una calibrazione dedicata per la VF2. È stata quindi calibrata la mappa di cambiata per ottimizzarne l'efficienza e si è ottenuta una riduzione di consumi ed un aumento del range elettrico.

Di seguito si visualizzano gli effetti dovuti ad uno sweep di regime di rientro per la cambiata in eDrive su un ciclo CS, con le stesse condizioni iniziali.

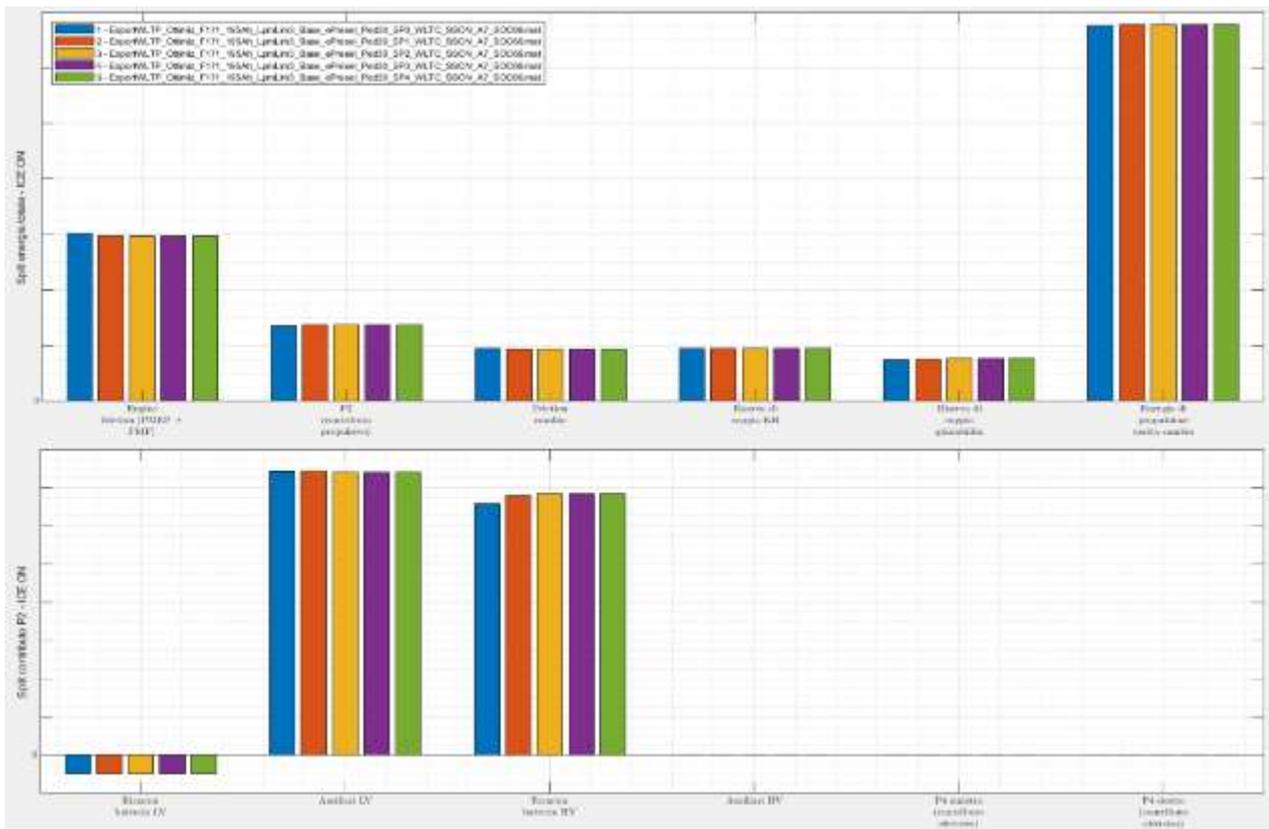


Figura 65 - Split consumi VF2 ciclo CS – sweep shift pattern

Le differenze tra le simulazioni effettuate con diversi shift pattern, ordinati con regime di rientro crescente, sono minime: si può notare però un maggior contributo rigenerativo da parte del ME P2 per la ricarica della batteria ad alta tensione, a parità di condizioni.

Questo implica un minor utilizzo dell'ICE su ciclo dovuto ad un aumento del range elettrico dettato dall'aumento di efficienza in guida eDrive. Dunque applicare la nuova strategia fornisce buoni risultati se abbinata ad uno shift pattern rialzato.

Di seguito viene visualizzato il confronto della divisione energetica di un ciclo CS tra la strategia base e la nuova strategia con coppia LPM e shift pattern ottimizzati.

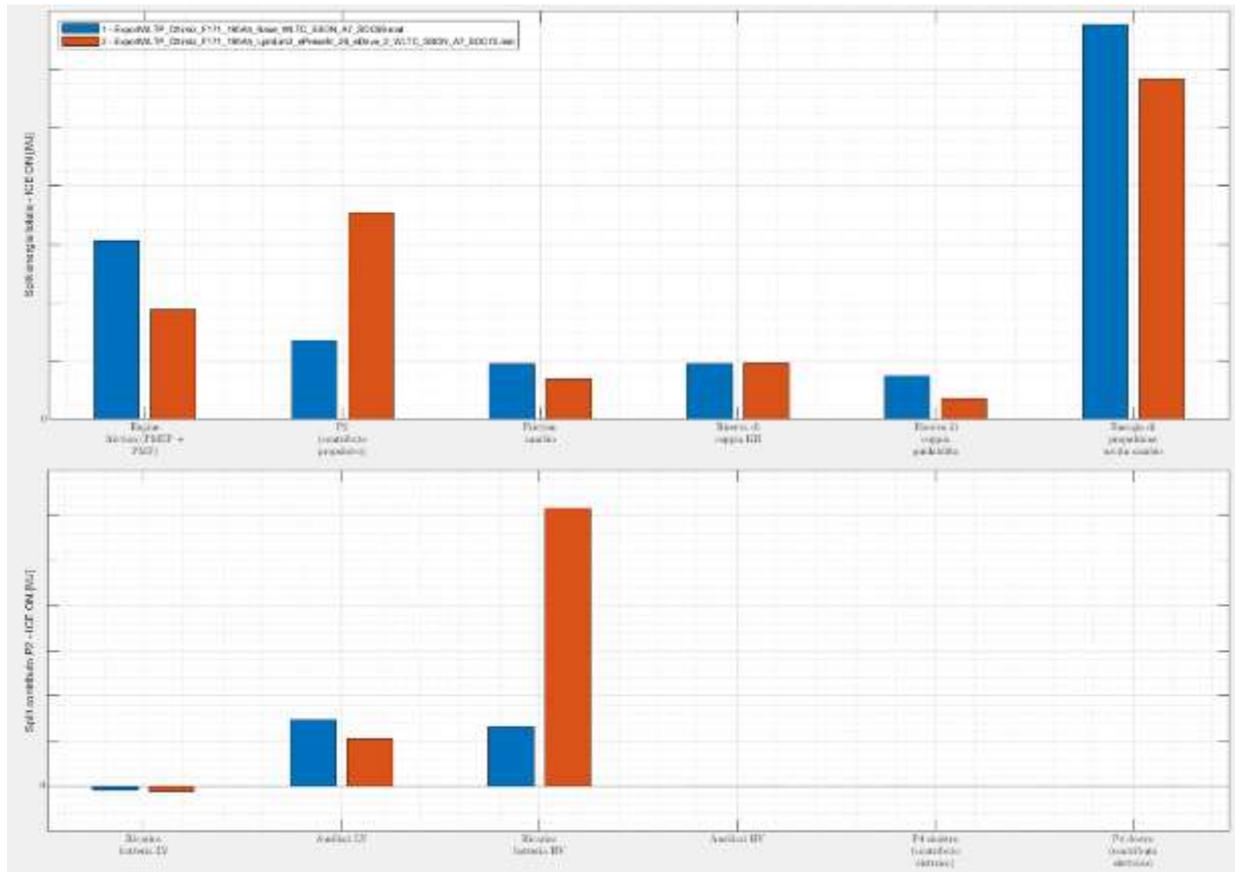


Figura 66 - Confronto energetico tra strategia base e nuova strategia sviluppata

Viene riportata la strategia base in blu e la nuova strategia in arancione: si può notare un aumento dell'energia ricaricata in batteria ad alto voltaggio tramite il ME P2 (aumentata di oltre quattro volte rispetto alla strategia base) con una conseguente riduzione dell'energia di propulsione. Questo significa un minor utilizzo dell'ICE ed una maggior efficienza complessiva del sistema. Quindi si sono ridotti tutti i contributi di perdita energetica attribuibili all'ICE, come friction e pompaggio, e allo stesso tempo si è incrementata l'efficienza di quest'ultimo durante il suo utilizzo.

5. Prove sperimentali

Dopo aver analizzato i risultati ottenuti tramite le simulazioni si procede con le prove sperimentali: una volta identificata la strategia ottimale, tramite simulazioni, si passa all'implementazione in centralina del software con la nuova strategia per poter procedere con le valutazioni sperimentali. Prima di tutto si faranno analisi al banco prova (allestito con motore endotermico V8, lo stesso della VF1, senza la presenza della trasmissione) per avere una prima validazione dei risultati **del calcolo dell'energia**; seguiranno poi prove e analisi in vettura su banco a rulli per confermare che i risultati delle simulazioni con la nuova strategia siano effettivamente migliorativi e procedere dunque ad una validazione delle simulazioni. Si eseguiranno poi analisi di split consumi tramite il tool di post processing per le prove sperimentali per valutare a cosa sia attribuibile la riduzione consumi riscontrata e se ci sia correlazione tra simulazione e test sperimentale.

5.1. Test banco prova

Un banco prova è essenzialmente costituito da un freno dinamometrico in grado di applicare una coppia resistente modulabile all'asse del motore in prova; questa si basa su vari tipi di freno che possono essere meccanici, idraulici o elettrici a correnti parassite in **funzione del tipo di motore che si vuole testare e della potenza erogata da quest'ultimo**. Un banco è costituito essenzialmente da un basamento sul quale viene fissato il motore da provare al cui albero, il punto da cui esso trasmette il moto, viene collegato un dispositivo di freno dinamometrico. Questo è supportato sul suo asse da cuscinetti ben dimensionati; è flottante ed al naturale movimento che assumerebbe se lasciato libero si contrappone il sistema di misura dalla coppia. I freni dinamometrici maggiormente utilizzati sono quelli a correnti parassite: il funzionamento di questi dispositivi frenanti è **basato sul principio delle "correnti parassite" o "correnti di Foucault"**, che vengono generate dal movimento di parti metalliche all'interno di un campo magnetico producendovi una modifica di flusso, cui corrisponde una forza frenante (perciò si parla di freni elettromagnetici). Di massima il freno è costituito da un rotore e da un disco polare, a forma stellare, che ruota fra due camere di raffreddamento integrate nel corpo

frenante, sedi di un campo magnetico prodotto da una bobina eccitata in corrente continua. La rotazione del disco polare provoca una variazione nel tempo del flusso magnetico, generando le correnti parassite sullo strato metallico delle superfici delle camere di raffreddamento; queste correnti indotte si oppongono alla variazione del flusso magnetico e, di conseguenza, al movimento del rotore. La forza generata dall'azione frenante del freno viene contrastata con una forza uguale e contraria da parte dello statore per via del principio di azione e reazione; in questa situazione l'intero corpo frenante, che è supportato all'estremità dell'albero da due cuscinetti, inizierebbe a ruotare su sé stesso ma questo viene impedito dalla cella di carico. La cella di carico è costituita da un insieme di estensimetri a resistenza, uniti a formare un *“ponte di Wheatstone”* (che consente una precisa misurazione della resistenza elettrica) e racchiusi in una custodia metallica di protezione. La forza da misurare deforma leggermente l'elemento di misura provocando una variazione di resistenza elettrica degli estensimetri proporzionale alla forza stessa. Il segnale che ne deriva viene amplificato ed elaborato, e permette di ricavare il valore della coppia **motrice in uscita dall'albero motore**: questo valore, moltiplicato per il numero di giri rilevati, permette di ricavare la potenza istantanea sviluppata dal motore.

Per poter effettuare una prova corretta bisogna adoperare vari accorgimenti come ventilatori per il raffreddamento del motore in prova, una slitta regolabile per il fissaggio del motore sul banco, e più computer, che servono a visualizzare e registrare i risultati delle prove. Inoltre l'intero complesso deve essere installato in un locale con atmosfera controllata, ossia il più possibile omogenea e indipendente dal periodo dell'anno e dalle condizioni meteo, ciò per evitare difformità di misurazione dovute a variazioni di temperatura, pressione atmosferica o tasso di umidità tanto grandi da non poter rientrare nel range ammesso per la correzione dei fattori ambientali. Per ogni prova effettuata si ricava un fattore di correzione, ricavato dalle condizioni di temperatura, pressione e umidità, in modo tale da normalizzare i dati acquisiti durante il test e renderli confrontabili con altre acquisizioni.

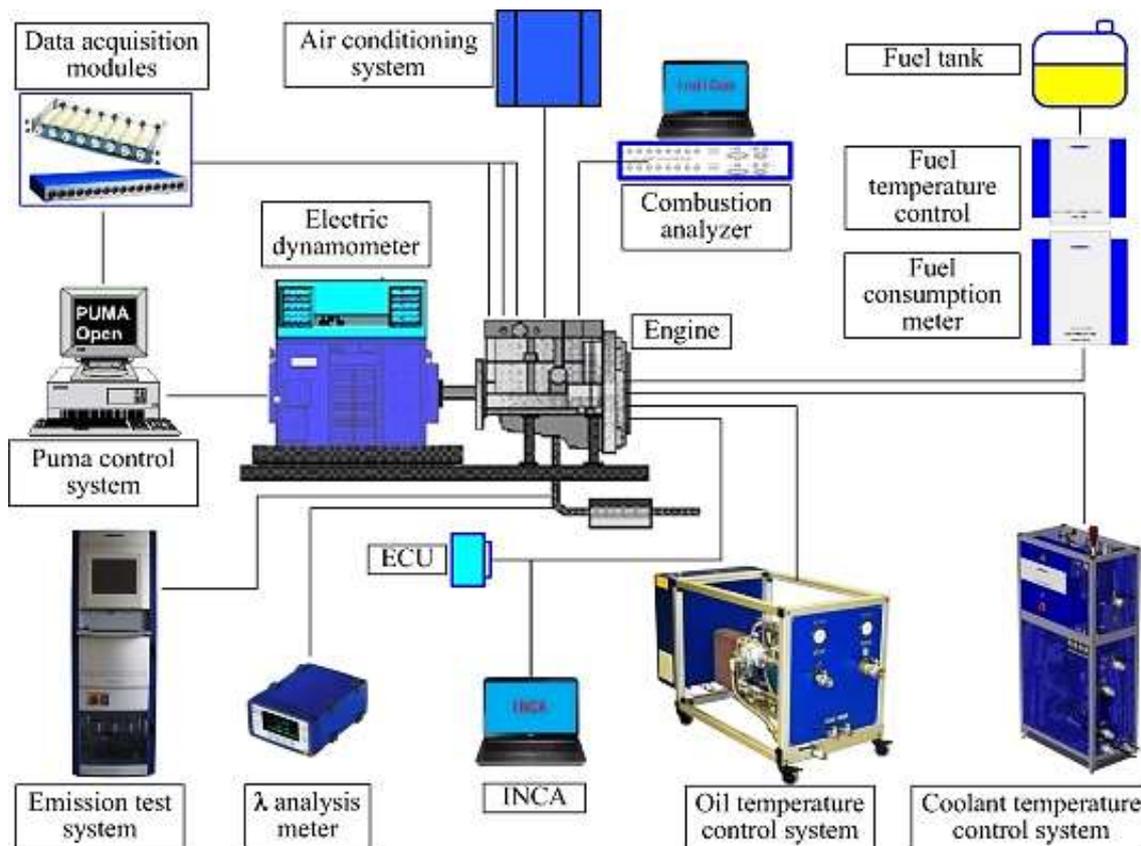


Figura 67 – Banco prova motore

Si effettua un primo test al banco prova allestito con il motore endotermico V8 e la macchina elettrica P1: non essendo montata la trasmissione, la centralina che controlla il cambio non è presente e vi è la necessità di simularla in modo virtuale per far sì di controllare il motore come se fosse montato in vettura in un ambiente reale: si utilizza dunque un H-I-L (*Hardware in the loop*), in modo che la centralina Motronic possa comunicare con una centralina “virtuale” e bypassare alcuni nodi del sistema di controllo non presenti in banco prova. In questo modo è possibile simulare al banco una procedura WLTP per iniziare a valutare quale delle modifiche e calibrazioni siano effettivamente migliorative e quali siano invece peggiorative o meno influenti. È possibile così avere una prima impressione sull’effettivo miglioramento ottenuto tramite simulazioni dato che i componenti reali installati rispondono ai segnali simulati come se stessero operando in un ambiente reale, poiché non sono in grado di distinguere segnali provenienti da un ambiente fisico da quelli prodotti da modelli software.

Inizialmente, nel banco prova in cui sono stati effettuati i test, la macchina elettrica P1 era gestita unicamente da PUMA, il sistema di controllo del banco, ed era utilizzata solo per

avviare il motore, come Start&Stop; in centralina Motronic tutto ciò che riguardava la macchina elettrica era inibito. Con la nuova configurazione la centralina riconosce la presenza della macchina elettrica ed attraverso la CAN (un canale di comunicazione che permette a periferiche e componenti di un sistema elettronico di interfacciarsi tra loro) si può gestire la P1 grazie a canali emulati da PUMA (come SOC HVB, limiti potenza massima, ecc.). Per compensare le differenti inerzie durante i transitori che si hanno al banco si utilizza il software AVL TestBed CONNECT (ETAS Inca), una piattaforma realtime che può far girare modelli, inclusi quelli di Simulink, come ad esempio il modello della trasmissione e comunicare con PUMA e la centralina motore. Il modello della trasmissione permette quindi di controllare la coppia resistente del freno in funzione della marcia simulata dal modello e dell'efficienza impostata sul software del banco: al momento della simulazione effettuata è stata impostata costante per tutte le marce. All'atto delle prove sperimentali effettuate per il presente lavoro il SOC della batteria ad alta tensione viene invece emulato da PUMA e non essendo presente un modello batteria questo rimane costante ad un certo valore impostato: ciò introduce una problematica per il confronto con le simulazioni dato che le strategie di controllo sviluppate si basano principalmente sullo stato di carica della batteria.

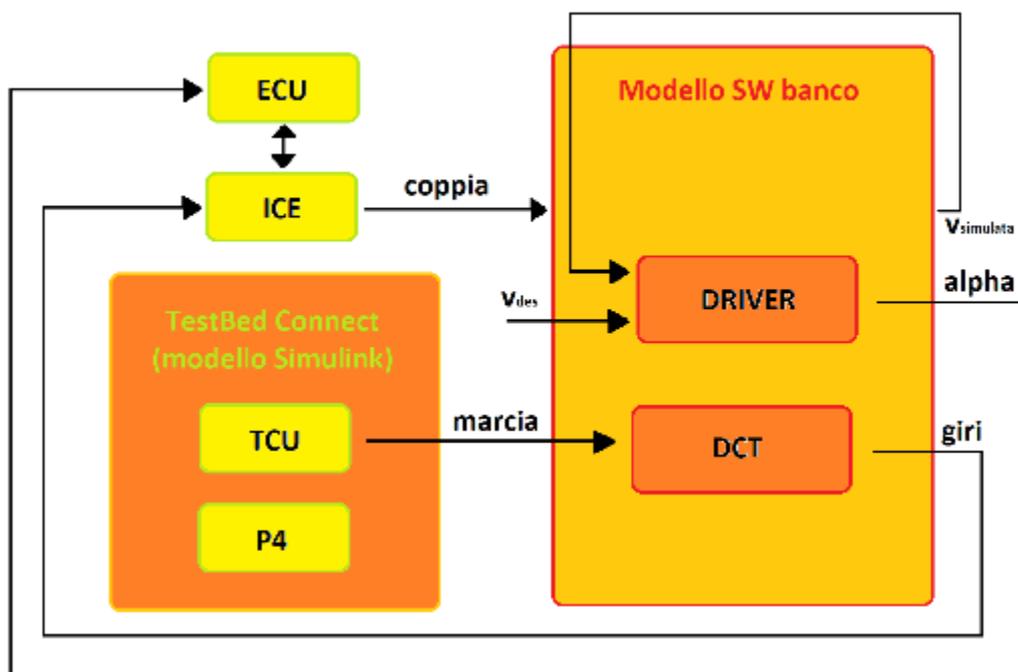


Figura 68 - Schema configurazione banco prova

Con questo sistema è possibile ricreare a banco un test di omologazione WLTP (ma anche qualsiasi altro tipo di test dal momento che si può implementare una diversa traccia di velocità) in modo da analizzare i consumi e le emissioni reali del motore endotermico.

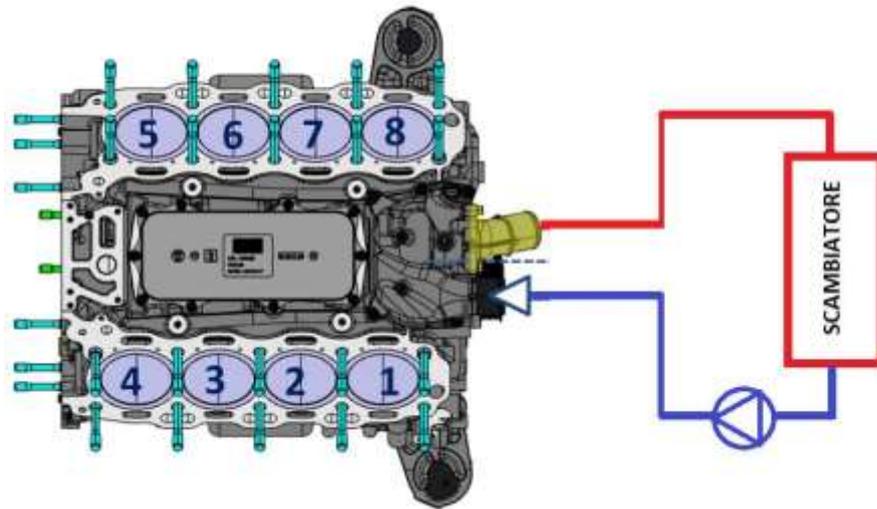


Figura 69 - Schema di raffreddamento forzato in banco prova

In vettura tra il ciclo CD e il ciclo CS bisogna lasciare raffreddare il motore, per un tempo di attesa di circa 6 ore; al banco prova è stata installata una pompa d'acqua esterna per poter raffreddare il motore anche da fermo, in modo tale da ridurre le

tempistiche di attesa tra una prova e l'altra. Successivamente, per il raffreddamento forzato dei catalizzatori, è stata impiegata la pompa dell'aria secondaria, attivabile manualmente o in modalità automatica.

Si fa in modo di seguire una traccia di velocità lineare della vettura, campionata in un ciclo WLTC, andando a controllare il motore endotermico e il motore elettrico P1 in modo da seguire il più fedelmente possibile la traccia. Inoltre viene utilizzato il freno dinamometrico per attuare la coppia resistente (coastdown) che si avrebbe alle ruote ridotta all'albero motore come se fosse montato sulla vettura, in funzione della marcia simulata e dell'efficienza del cambio. Il "coastdown" serve per avere una misurazione il più reale possibile: questo permette di predeterminare l'esatta misura degli assorbimenti generati dagli organi di trasmissione, dallo pneumatico e soprattutto dalla resistenza aerodinamica. La prova per determinare i valori di coastdown consiste nel portare la vettura ad una certa velocità per poi azionare la frizione e lasciare diminuire progressivamente la velocità, sino a fermarsi, quindi fino ad aver scaricato tutta l'energia precedentemente accumulata. La curva che si ricava dal test di coastdown è di natura

cubica rispetto alla velocità vettura: per questo motivo i mezzi più veloci e con pneumatici più abbondanti sono anche quelli che risultano globalmente più penalizzati dalle perdite per attrito.

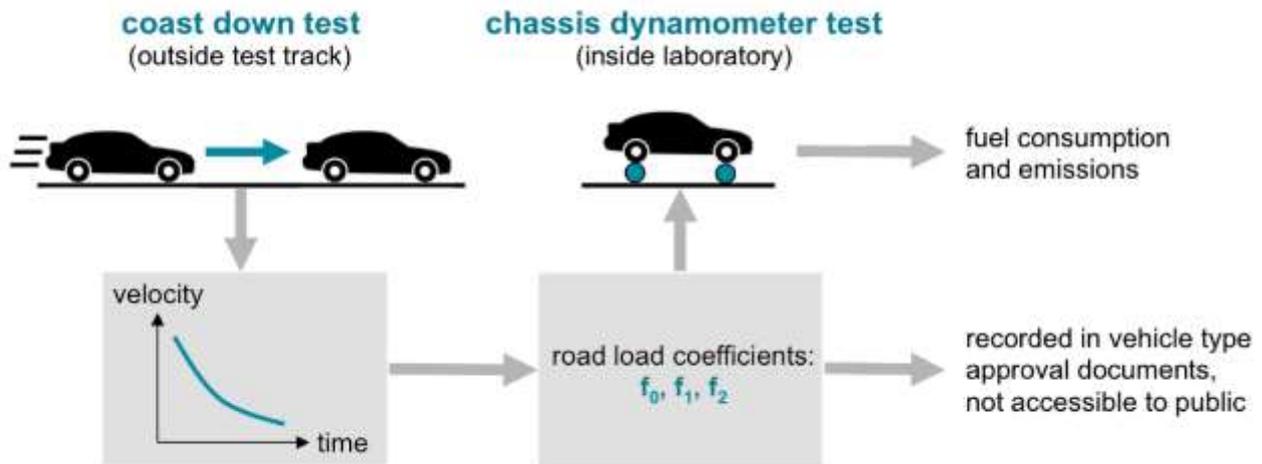


Figura 70 - Test coastdown

Questo dato deve essere calcolato come media aritmetica dei valori ottenuti con almeno 5 prove effettuate sulla vettura al completo. La curva di coastdown viene definita tramite tre parametri (F0, F1 e F2) attraverso la seguente formula:

$$\text{Coastdown} = F0 + F1 * v + F2 * v^2$$

Si può notare quindi che ogni parametro definisce una certa resistenza: indicano principalmente la resistenza dovuta all'inerzia del veicolo (quindi la massa), quella dovuta al rotolamento degli pneumatici e la resistenza aerodinamica. Tramite questi tre parametri ne vengono calcolati altri tre che definiscono gli assorbimenti che deve generare il rullo per far sì di ricreare le stesse condizioni che si avrebbero in vettura. Nei test al banco prova motore la curva di coastdown serve a definire quanta coppia resistente deve attuare il freno. La coppia resistente che deve attuare il freno è quindi la coppia resistente che si avrebbe alle ruote, riportata a livello della frizione, comprensiva dell'efficienza della trasmissione (che in questo caso è stata impostata ad un valore costante nel modello trasmissione per tutte le marce).

La curva di coastdown ricavata dal test precedentemente descritto è quella blu; la curva rossa è invece la curva di coastdown ricreata al banco prova utilizzando il freno in modalità

dinamica (non tutti i freni sono controllabili dinamicamente), quindi applicando una certa coppia resistente all'albero come se fosse realmente montato in vettura.

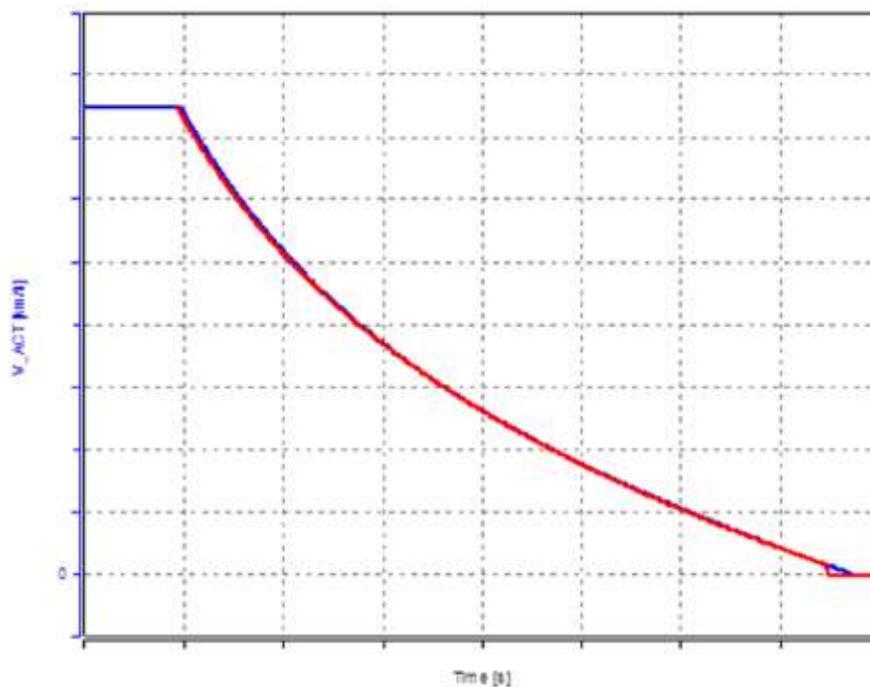


Figura 71 - Confronto coastdown banco prova (blu) e vettura (rosso)

Dal confronto della curva del coastdown tra banco prova e vettura si osserva una quasi perfetta sovrapposizione delle due: avendo validato la curva di coastdown utilizzata durante le prove si può procedere con l'analisi dei test sperimentali in banco prova.

Per poter misurare le emissioni del motore endotermico in banco prova viene utilizzato un sistema presente nel condotto di scarico della cella, tramite il quale è possibile campionare le emissioni di CO₂ ed inquinanti. Le emissioni durante la prova vengono campionate dal sistema MEXA capace di misurare i livelli di CO₂ e le concentrazioni di inquinanti come HC, CO, NO_x.

Questo sistema presenta diverse sonde disposte lungo il condotto di scarico in diverse posizioni:

- PRE: le sonde sono posizionate prima del catalizzatore (“engine out”);
- MID: le sonde sono posizionate tra il catalizzatore e il GPF;
- TP (*Tailpipe*): le sonde sono posizionate subito dopo il GPF;
- DILN: le sonde sono posizionate nel tunnel di diluizione.

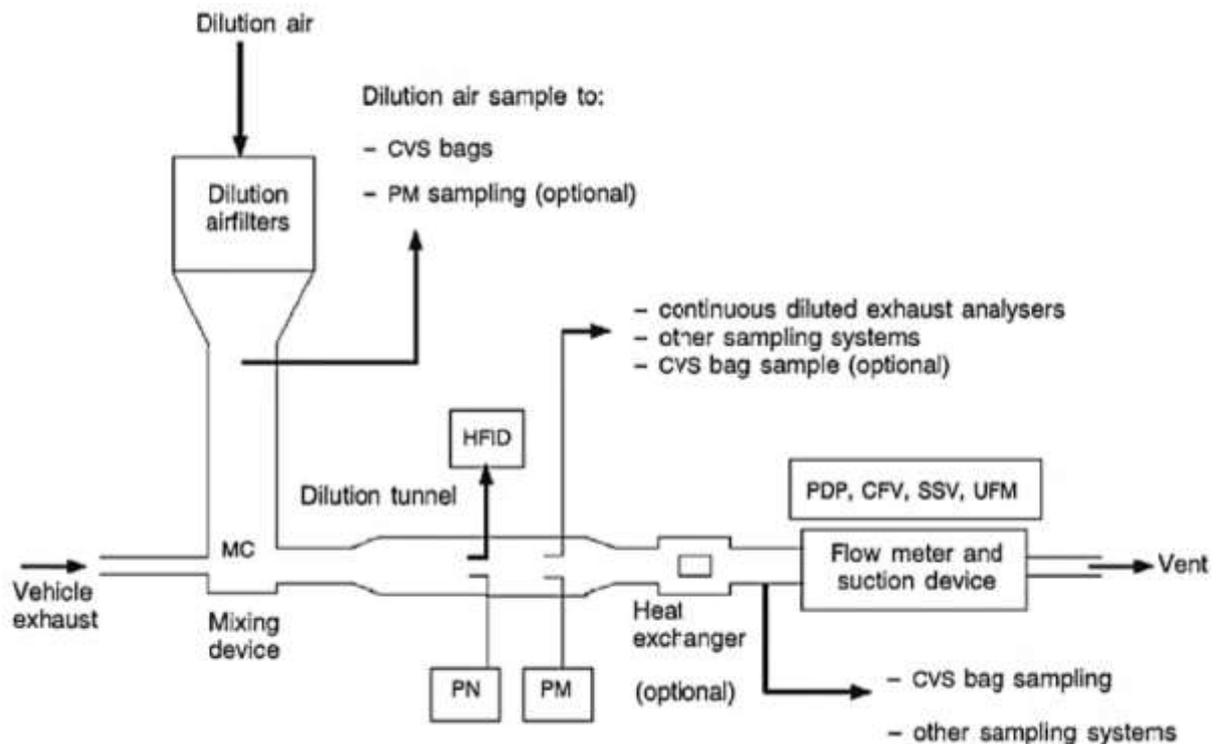


Figura 72 - Sistema di campionamento delle emissioni

Il sistema utilizzato per l'analisi delle emissioni viene mostrato nella precedente immagine, riportata nella normativa di omologazione. Sapendo che la disposizione delle sonde lungo il condotto di scarico è differente, anche i segnali delle emissioni saranno "traslati" tra loro di una quantità più o meno proporzionale alla distanza dal motore: questo è dovuto al trasporto dei gas di scarico lungo il condotto, quindi c'è la necessità di traslare i segnali per allinearli tra loro in modo da far coincidere i picchi di emissione. Il tool di post processing sviluppato, di cui si è parlato precedentemente, presenta una funzione interna che permette un allineamento automatico di questi segnali con i giri motore: in questo modo è possibile valutare quali manovre risultano particolarmente gravose sulle emissioni.

5.1.1. Confronto tra simulazioni e test sperimentali banco prova

Si analizzano in questo paragrafo i risultati ottenuti dai test in banco prova. Come già anticipato il modello batteria non è presente e quindi lo stato di carica viene emulato da PUMA: questo corrisponde ad un valore di stato di carica della batteria ad alta tensione

impostato costante per tutta la prova ed introduce una problematica per il confronto con le simulazioni. Essendo la strategia basata principalmente sulle condizioni dello stato di carica le uniche condizioni di entrata/uscita da eDrive sono dovute al superamento delle soglie di velocità, mentre non si presentano altre condizioni per SOC. Dunque, tenendo in considerazione queste complessità si **procede all'analisi** dei cicli effettuati in banco prova. Di seguito viene mostrato un ciclo WLTC effettuato in banco prova: vengono mostrati i giri motore, lo stato di carica, la coppia P2 e ICE, la traccia pedale e la traccia di velocità.

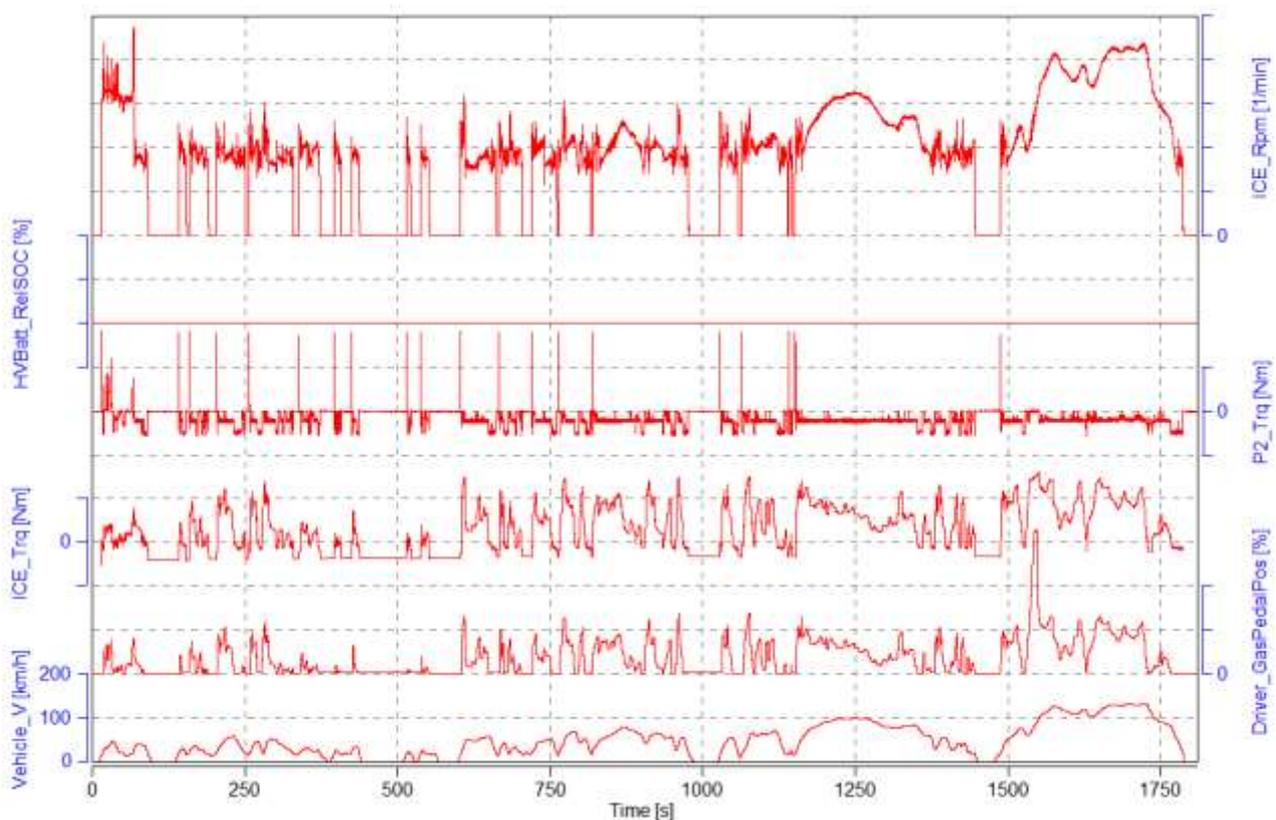


Figura 73 - Test banco prova (ciclo WLTC CS)

Per i problemi esposti in precedenza non si possono confrontare la simulazione con la prova sperimentale. Essendo lo stato di carica impostato ad un valore costante anche la coppia P1 ne risente, dato che la mappa LPM dipende dal Δ SOC: quindi la coppia erogata dal motore elettrico P1 dipende solamente dalla coppia richiesta al pedale o per altre funzioni a cui è adibito il ME P1.

In banco prova viene misurata la portata del combustibile: risulta dunque di rilevante **interesse l'analisi** della divisione energetica e il confronto tra energia meccanica, calcolata

dallo split di coppia, con quella ricavata dalla portata del combustibile. In questo modo è possibile ottenere una validazione reale del calcolo energetico per valutare che siano stati presi in considerazione tutti i contributi di energia.

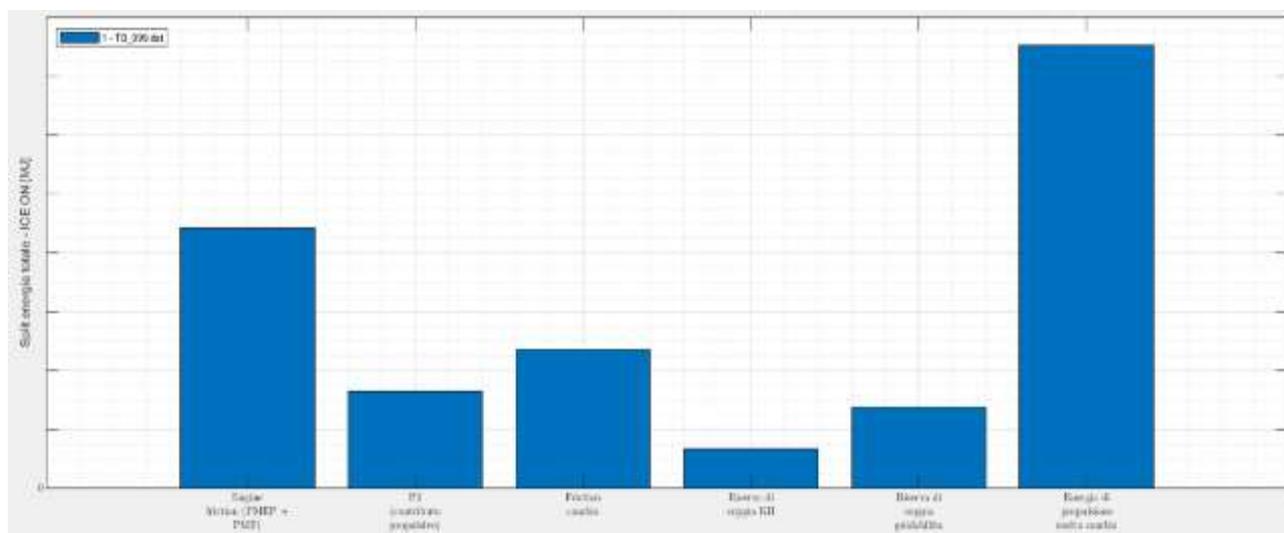


Figura 74 - Divisione energetica banco prova

In banco prova, non essendo montata la trasmissione, questa viene simulata e dunque l'energia spesa per le friction del cambio viene ricavata dal valore di efficienza impostato al banco: questo valore è costante per tutte le marce e non varia per diversi valori di carico e regime.

Dall'analisi energetica effettuata su un ciclo al banco prova si evidenzia una maggiore differenza tra l'energia totale calcolata dallo split di coppia e quella invece ricavata dalla portata di combustibile rispetto al delta teorico stimato da piano quotato. La portata di combustibile viene misurata tramite un apposito sistema in banco prova (AVL FuelExact), il quale viene utilizzato per effettuare misurazioni di portata del carburante ad alta precisione: non occorre solamente disporre di un sensore preciso ma anche di un sistema di condizionamento del carburante in grado di mantenerne la temperatura entro bassi limiti. Inoltre, la maggior parte delle misurazioni richiedono che il carburante col quale si alimenta il motore presenti una temperatura regolabile. Da catalogo il sistema presenta una certa precisione: gli errori sistematici di linearità sono compensati, cosicché è rispettato un limite di errore del $\pm (0,1\% + 0,002 \text{ kg/h})$; componenti casuali dell'incertezza di misura dipendono principalmente dalla stabilità reale del flusso determinata dal dispositivo.

La differenza rilevata tra energia totale ed energia ricavata dalla portata combustibile è mediamente minore al 2% quindi si può considerare una correlazione abbastanza buona: considerando errori dovuti all'interpolazione del piano quotato del rendimento di combustione e alla precisione del sistema di misurazione della portata combustibile (anche se minimi), oltre che ad errori nel calcolo energetico dallo split di coppia, questa differenza risulta comunque di lieve entità. Si può dunque validare in modo assoluto la divisione energetica effettuata dal tool di post-processing.

5.2. Test su banco a rulli VF1

Dopodiché si passa ai test su banco a rulli con la vettura al completo in modo da verificare che le modifiche e le calibrazioni apportate al nuovo sistema di controllo siano effettivamente vantaggiose in un'ottica di riduzione consumi.

Le caratteristiche tecniche minime che debbono essere previste per il banco a rulli da utilizzarsi per le prove di omologazione e dunque per le verifiche delle emissioni saranno di seguito descritte. Parte dell'attrezzatura deve essere inequivocabile e deve consentire l'esecuzione delle prove in modo completo ed in piena sicurezza. Durante l'esecuzione della prova l'apparecchiatura deve essere in grado di misurare alcune grandezze fondamentali (come ad esempio la velocità della vettura e lo spazio percorso) e di permetterne la visualizzazione e la stampa: la velocità periferica del rullo è uguale alla velocità del veicolo, a meno di slittamenti tra rullo e pneumatico, e questo permette di ricavare le grandezze fondamentali. Inoltre un sistema di acquisizione collegato alla centralina permette di campionare i segnali provenienti da quest'ultima durante la prova, in modo da valutare la gestione dell'energia durante il test. Anche nel banco a rulli è presente un sistema di misurazione delle emissioni lungo il condotto di scarico, precedentemente descritto.

Il banco a rulli è composto dai seguenti elementi base:

- Banco con uno o più telai e dispositivi tali da permettere il test, quindi una struttura portante idonea a sopportare le sollecitazioni di esercizio;

- Due rulli frenati da dispositivi di assorbimento della potenza sullo stesso asse di rotolamento e due rulli folli (o quattro rulli frenati per le vetture a trazione integrale);
- Dispositivi di sicurezza, ancoraggio e bloccaggio del veicolo a terra e coperture delle parti dei rulli non utilizzati durante le prove;
- Un'unità di acquisizione ed elaborazione dei dati di prova;
- Dispositivi di raffreddamento del motore del veicolo per evitarne il surriscaldamento;
- Un sistema di rilevamento della velocità di rotazione dei rulli adeguato alla configurazione scelta dal costruttore.

Le dimensioni e le soluzioni tecniche adottate devono consentire il corretto posizionamento del veicolo in piano durante la prova e assicurare la corretta esecuzione della prova anche con veicoli con ruote di diametro minimo e con distanze da terra limitate. I dispositivi di ancoraggio e bloccaggio debbono essere idonei a garantire la non espulsione del veicolo dai rulli in caso di blocco accidentale dei rulli o delle ruote del veicolo durante l'esecuzione della prova: tale requisito s'intende verificato se, applicando una forza orizzontale di una certa entità in direzione longitudinale al telaio del veicolo nel verso di marcia del veicolo ed in quello opposto, non si verifica la fuoriuscita del veicolo dai rulli; inoltre le forze trasmesse dai dispositivi non debbono creare danni al veicolo.

Nel caso in cui sia utilizzato un dinamometro in modalità a due ruote motrici per la prova, l'impostazione della resistenza all'avanzamento deve essere effettuata su un dinamometro in modalità a due ruote motrici, mentre nel caso in cui venga utilizzato un banco dinamometrico in modalità a quattro ruote motrici, l'impostazione della resistenza all'avanzamento deve essere effettuata su un dinamometro in modalità a quattro ruote motrici (un dinamometro per due ruote motrici oppure un dinamometro per quattro ruote motrici che simula l'inerzia e la resistenza all'avanzamento soltanto sull'asse motorizzato del veicolo sottoposto a prova mentre le ruote sull'asse non motorizzato non influenzano il risultato della misurazione, indipendentemente dal fatto che ruotino o no).

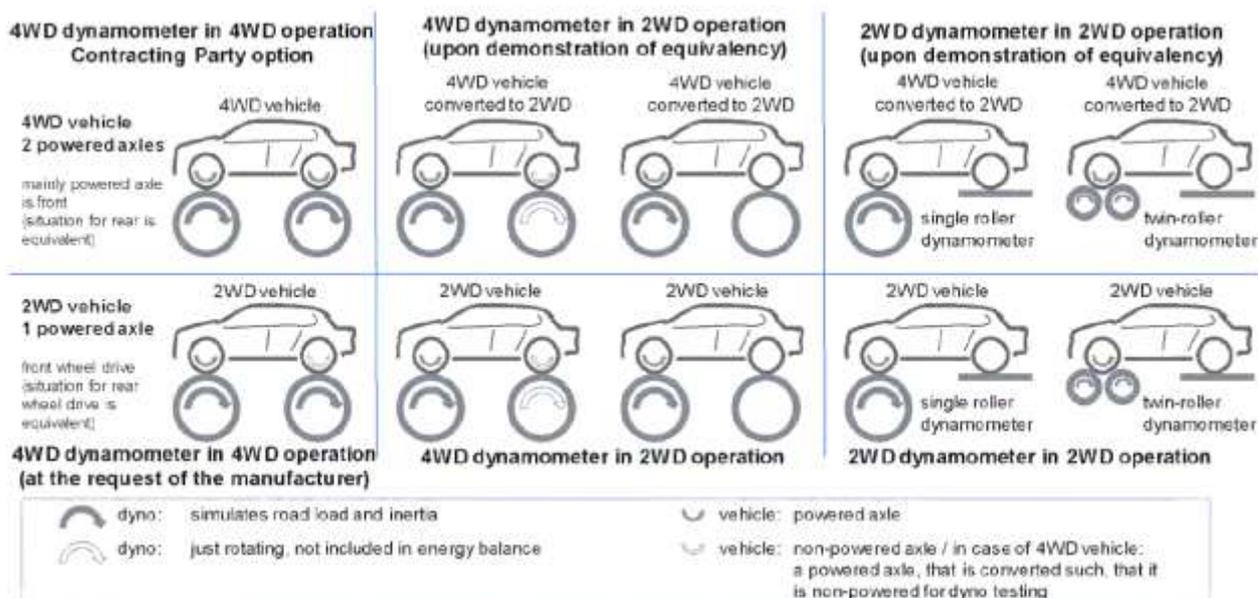


Figura 75 - Possibili configurazioni (2WD e 4WD dynamometer) da normativa

Essendo una vettura a trazione integrale, anteriormente motorizzata elettricamente mentre posteriormente dal motore a combustione interna, il banco a rulli su cui viene eseguita la prova dev'essere equipaggiato con un dinamometro 4WD che simula l'inerzia e la resistenza all'avanzamento su entrambi gli assi del veicolo sottoposto a prova. Per ricreare la coppia resistente che si avrebbe su strada viene impostata una certa coppia resistente dei rulli, dinamicamente variabile con la velocità vettura, calcolata utilizzando il coastdown ricavato dal test illustrato nel capitolo precedente: in questo modo è possibile ricreare le stesse identiche condizioni di resistenza che si avrebbero su strada. Il banco è dotato di un software che consente, partendo dai valori di potenza al rullo, di parametrizzarli con i valori di coastdown per ottenere le giuste condizioni di resistenza.

Il test su banco a rulli consiste in una prova effettuata con la vettura al completo posizionata sui rulli: il driver è tenuto a seguire una determinata traccia di velocità, in questo caso un ciclo omologativo WLTC, che viene visualizzata su uno schermo, ed agendo sui pedali dell'acceleratore e del freno permette di seguire la traccia il più fedelmente possibile. La differenza tra la traccia di velocità teorica con quella effettiva dev'essere compresa entro certi limiti dato che la procedura di omologazione WLTP presenta una certa tolleranza da rispettare sulla traccia di velocità, descritta dalla seguente

immagine: la curva nera è la traccia della velocità desiderata mentre le curve tratteggiate rappresentano i limiti massimi da rispettare.

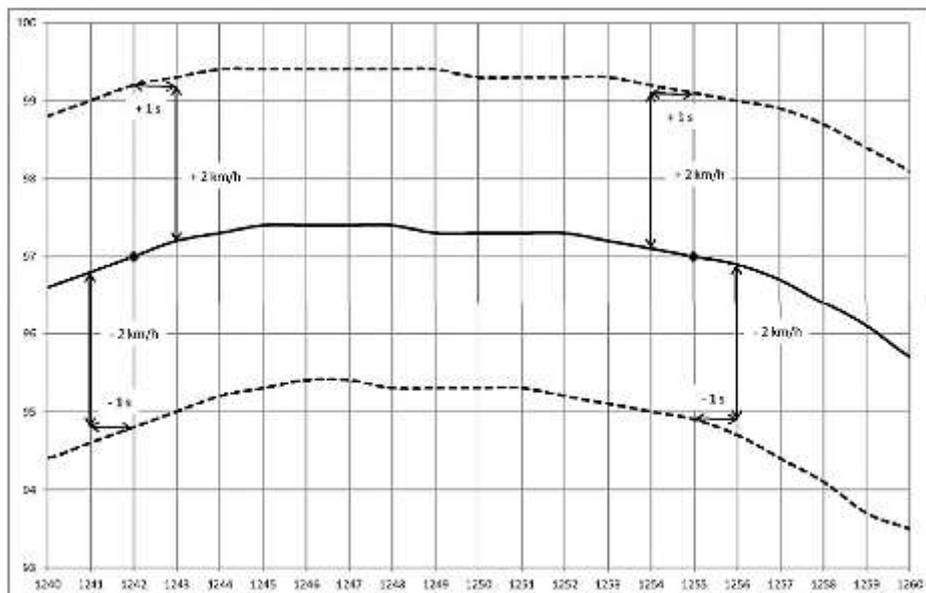


Figura 76 - Tolleranza da rispettare sulla traccia di velocità

Verranno quindi prese in considerazione le prove più attendibili che soddisfano questo vincolo dettato dall'omologazione.

5.2.1. Confronto tra simulazioni e test sperimentali banco a rulli

Si analizzano di seguito i risultati ottenuti dalle prove sperimentali in vettura su banco a rulli e si confrontano con quelli ottenuti tramite simulazioni.

Dato che alcune tra le regole su cui è basata la nuova strategia implementate nel modello Simulink non sono presenti nel sistema di controllo attuale vi è stata la necessità di effettuare alcune modifiche software in centralina prima di poter effettuare le prove.

Si procede ora ad illustrare i risultati delle prove sperimentali condotte a bordo del veicolo ibrido sul banco a rulli e a valutare le differenze riscontrate nel ciclo CS tra simulazione e prova sperimentale. Per far in modo di ottenere un confronto più attendibile è stata utilizzata la traccia di velocità reale della prova sperimentale come input per la simulazione (per non avere, ad esempio, differenti riaccensioni dell'ICE dovute al superamento delle soglie di velocità e per avere una traccia del pedale più confrontabile tra simulazione e

prove sperimentale) ed inoltre si è impostato il valore di SOC ad inizio ciclo uguale a quello della prova sperimentale: in questo modo si può procedere ad un confronto più attendibile tra le due.

Sono state eseguite diverse prove al banco a rulli e tra queste ne è stata selezionata una tra le più significative ed attendibili: questa è stata confrontata con la simulazione effettuata utilizzando lo stesso software implementato in centralina, le stesse condizioni iniziali e la stessa traccia di velocità.

Nel grafico mostrato si possono vedere le due tracce sovrapposte: in blu la simulazione con modello Simulink mentre in rosso le misure acquisite durante la prova al banco a rulli.

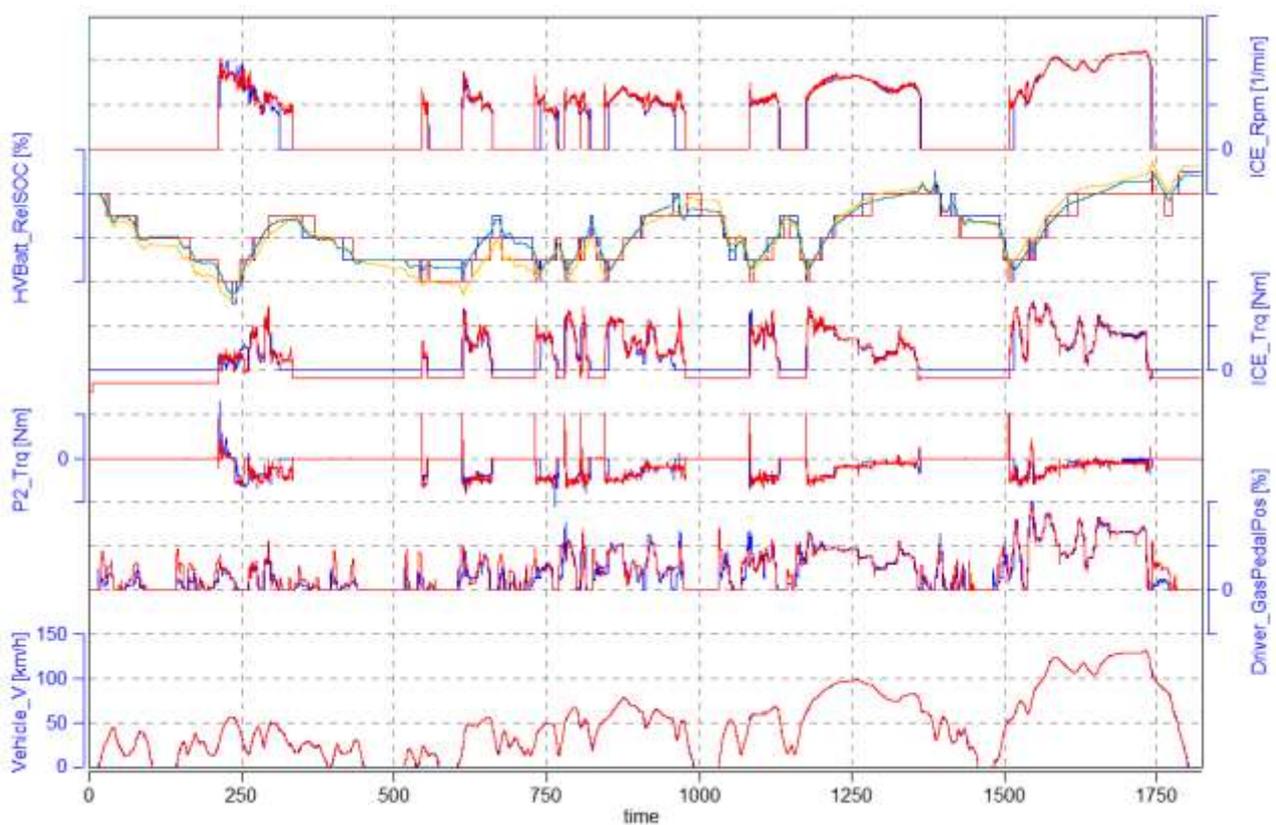


Figura 77 - Confronto tra ciclo CS simulato (In blu) e ciclo CS reale (In rosso)

Vengono visualizzati in ordine dall'alto i giri motore, lo stato di carica (discretizzato e continuo), la coppia dell'ICE e del ME P1, la traccia del pedale e la traccia di velocità. A primo impatto le tracce risultano praticamente sovrapposte a meno di lievi differenze: la coppia ICE e la coppia P1 risultano sovrapposte quasi perfettamente tranne in quei punti in cui si ha uno stato di carica differente (dato che la coppia LPM dipende dal Δ SOC).

Si possono immediatamente notare alcune zone dove l'ICE si è acceso in maniera differente nella prova sperimentale rispetto alla simulazione: queste differenti accensioni sono dovute principalmente al diverso stato di carica della batteria e alle tracce del pedale leggermente differenti tra prova sperimentale e simulazione. La carica della batteria ad alto voltaggio risulta quindi differente in quelle parti del ciclo dove si sono notate alcune differenti riaccensioni; procedendo verso la fine del ciclo WLTC questa differenza viene colmata e l'andamento del SOC risulta molto simile. Essendo la mappa di coppia LPM dipendente dal Δ SOC questa influisce sulla coppia erogata da P1: se lo stato di carica differisce tra simulazione e test sperimentale si può notare una diversa coppia P1; per il resto del ciclo risultano sovrapposte quasi perfettamente, sia la coppia P1 che quella dell'ICE. Si può notare inoltre che il SOC a fine ciclo differisce dal SOC ad inizio ciclo: questa differenza rientra nella tolleranza stabilita dalla normativa e implica peraltro un maggior consumo speso per ricaricare la batteria. Quindi si ha un delta energetico positivo tra inizio e fine ciclo; da normativa è previsto un certo fattore di correzione tale per cui, se lo stato di carica complessivo (sia della batteria ad alta tensione che quella a bassa tensione) differisce tra inizio e fine ciclo, si può correggere il consumo misurato: questo fattore di correzione si può ricavare da prove iterative a differenti stati di carica. In questo caso si avrebbe quindi una correzione del consumo negativa che significherebbe un minor consumo su ciclo.

Queste accensioni sono comandate da regole basate principalmente sullo stato di carica: come si può notare il SOC della batteria ad alto voltaggio non è continuo ma è discretizzato in vettura: per fare in modo di ottenere un confronto più attendibile è stato utilizzato anche in simulazione un SOC discreto. Per ottenere una miglior correlazione quindi si è modificata la quantizzazione del SOC che utilizza il modello Simulink e si è impostata ad un valore equivalente a quella utilizzata in vettura. Questa discretizzazione influenza l'ingresso e l'uscita da eDrive dato che le regole che governano la strategia si basano essenzialmente sullo stato di carica: per confrontare quindi l'andamento del SOC reale è stato ricalcolato tramite integrazione della corrente che fluisce in batteria ad alto voltaggio secondo la seguente formula:

$$SOC_{ricalcolato} = SOC_{iniziale} + \frac{\int I_{HVB} dt}{3600 * C_{Ah}} * 100$$

In questo modo si è ottenuto un andamento realistico del SOC (in giallo per vettura e in verde per la simulazione): la centralina però, come già detto in precedenza, utilizza un SOC discreto per valutare le condizioni di ingresso e uscita da eDrive: questo rappresenta una problematica dal momento che, se questa discretizzazione fosse più fine, si avrebbe una migliore gestione dell'energia a bordo.

Si sono inoltre notate alcune discrepanze tra le due tracce del pedale: si possono vedere rilasci pedale differenti tra simulazione e prova sperimentale i quali causano lo spegnimento dell'ICE in maniera differente tra le due. Queste differenze nelle tracce pedale sono imputabili al fatto che un driver reale risponde in maniera differente rispetto al modello di driver simulato: questo implica dunque una variabilità sperimentale tale da non ottenere una perfetta correlazione tra test reali e prove simulate. Eppure, tenendo in considerazione queste variabilità che non è possibile evitare, non si notano altre sostanziali differenze: le tracce pedale, sperimentale e simulata, risultano quindi molto simili.

Si sono evidenziate le discrepanze principali che influenzano la gestione delle condizioni di ingresso e uscita da eDrive e andando a fare degli zoom laddove vi sono differenti riaccensioni si può valutare per ognuna di queste quale motivo abbia portato all'accensione dell'ICE e quali invece allo spegnimento: vengono di seguito visualizzati tre parti del ciclo dove si sono notate differenze evidenti.

Nel primo zoom non è evidente perché in simulazione ci sia uno spegnimento mentre nella prova sperimentale in vettura non si presenti: si può notare però che in vettura il pedale non viene rilasciato completamente ma rimane ad un valore percentuale leggermente superiore allo 0; anche nel terzo zoom succede la stessa cosa, però in simulazione. Le altre riaccensioni sono dovute principalmente al raggiungimento del limite minimo per lo stato di carica. Non sono presenti invece riaccensioni dovute ad una coppia richiesta al pedale troppo elevata, oltre alla coppia massima disponibile in eDrive, dato che sul ciclo omologativo non vi sono fasi dove viene richiesta una coppia così elevata.

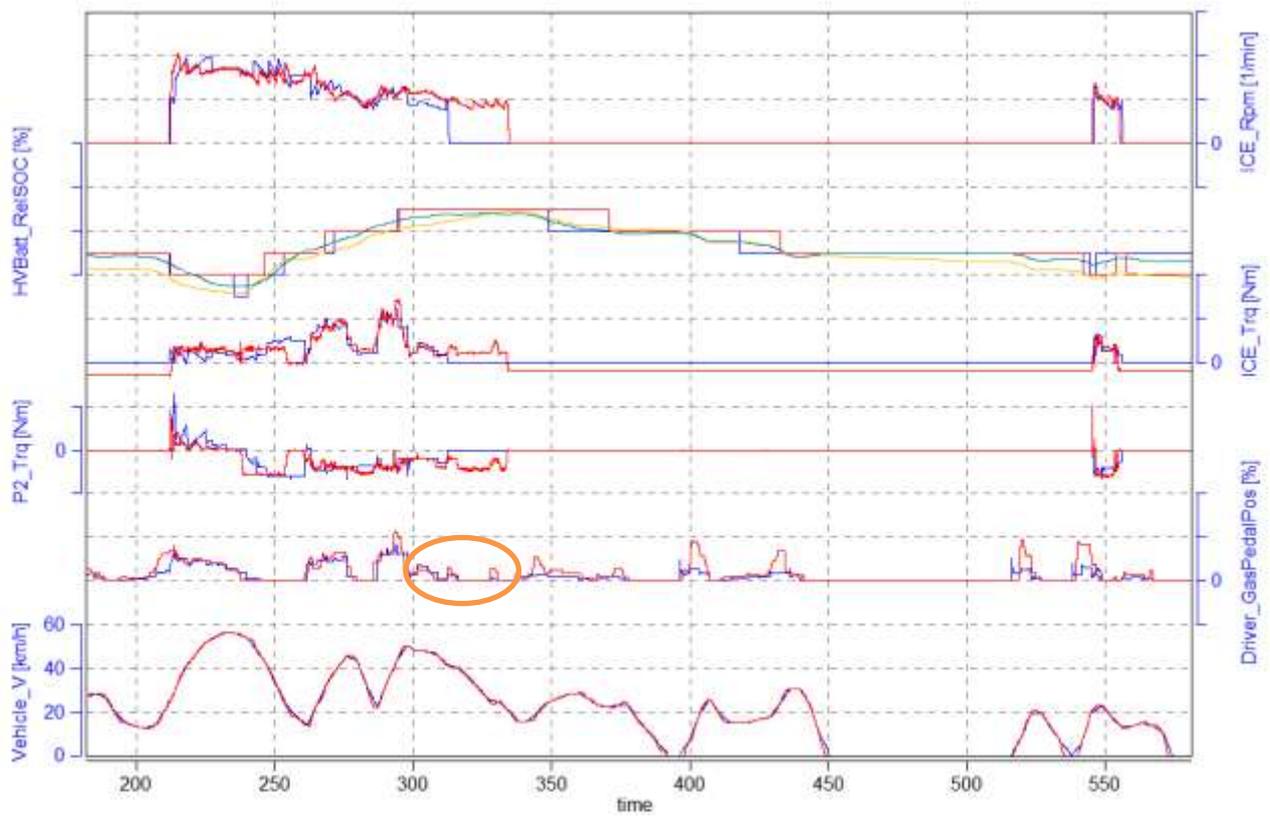


Figura 78 - Zoom 1 (confronto ciclo CS)

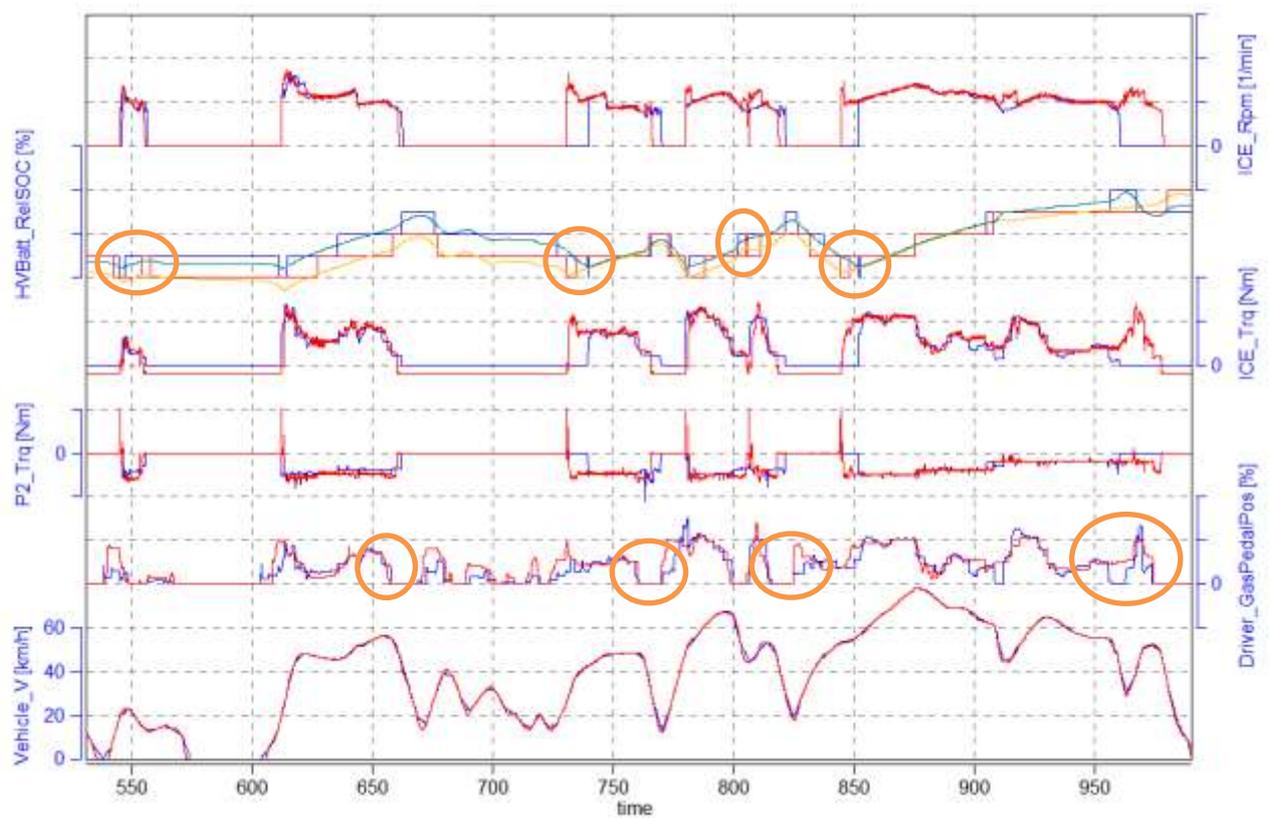


Figura 79 - Zoom 2 (Confronto ciclo CS)

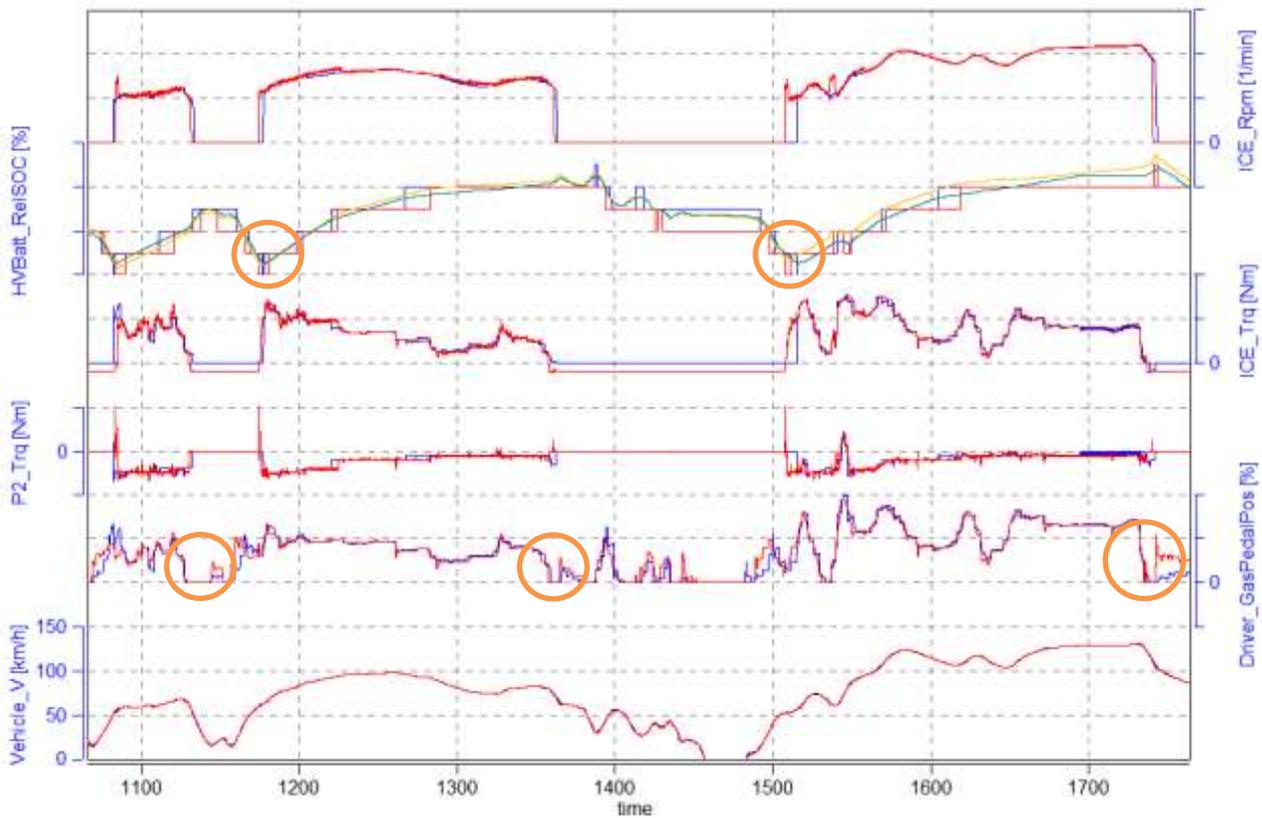


Figura 80 - Zoom 3 (Confronto ciclo CS)

Nonostante tutto, considerando i problemi precedentemente esposti, analizzando le emissioni di CO₂ sull'intero ciclo e calcolando la massa prodotta durante le fasi in cui le accensioni del motore sono differenti tra simulazione e prova sperimentale si può valutare cosa abbia portato ad un maggiore consumo in prova sperimentale. I vantaggi ottenibili sul consumo con la nuova strategia sono stati esposti nel capitolo dedicato ai risultati delle simulazioni e, confrontando il risparmio in termini di emissioni, si possono considerare confrontabili: dalla prova su banco a rulli risulta un risparmio di circa 28 g/km rispetto alla calibrazione base contro i 34 g/km ottenuti tramite simulazione. Risulta comunque un buon risultato considerando le problematiche esposte precedentemente da cui derivano differenti tempi di accensione dell'ICE.

Tra le prove sperimentali effettuate ne sono state selezionate alcune tra le più attendibili, una delle quali è stata analizzata e confrontata con la simulazione. Viene eseguito dunque un confronto energetico tra ciclo sperimentale e ciclo simulato. Questo è un confronto tra due tipologie diverse di acquisizione quindi si avranno alcune differenze dettate dai diversi metodi di calcolo e altre dal fatto che non si ha una perfetta correlazione tra le due prove.

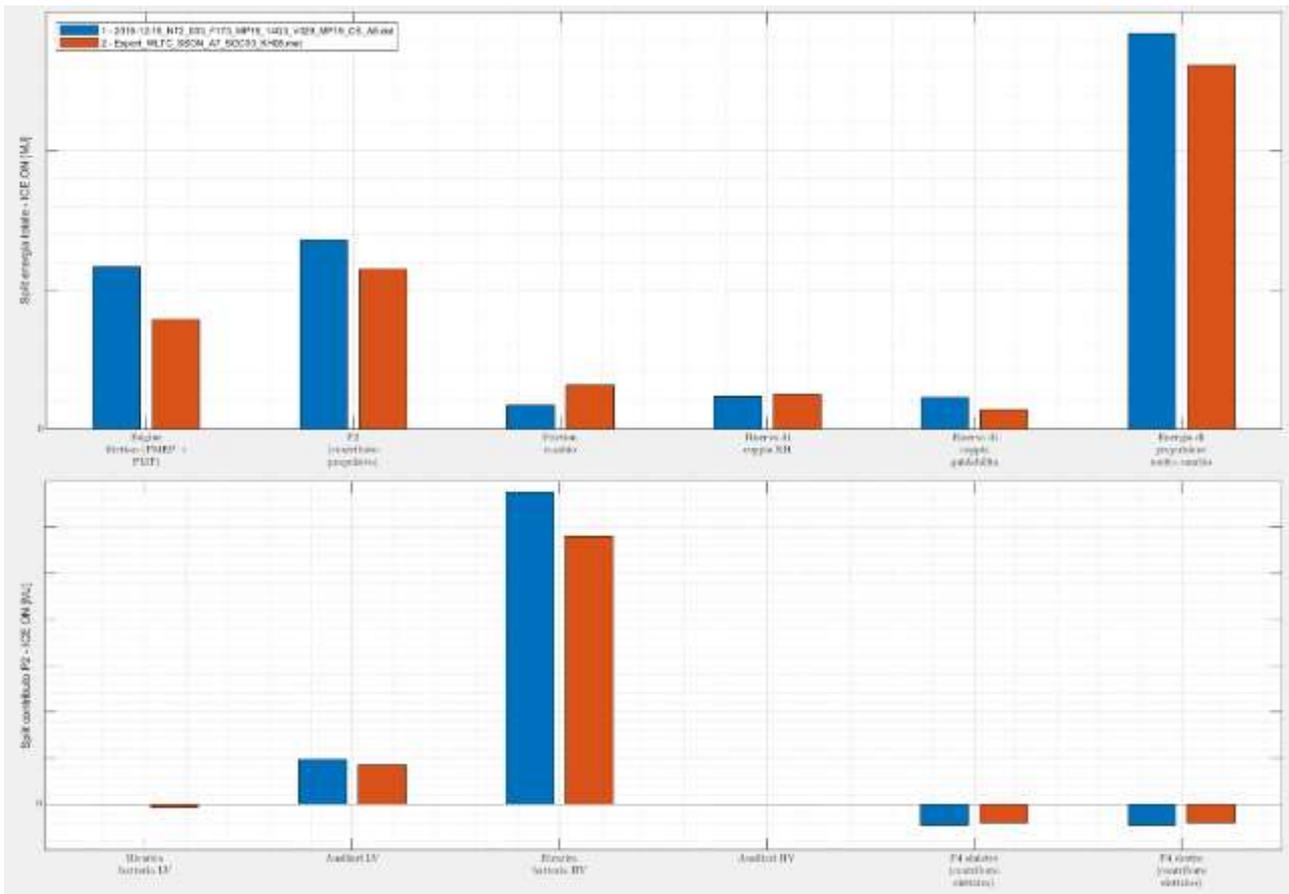


Figura 81 - Confronto energetico prove sperimentali e simulazione

La prova sperimentale che è stata analizzata precedentemente è riportata con il colore blu mentre la simulazione con il colore arancione. Considerando le problematiche già esposte nel capitolo che descrive la divisione dei consumi effettuata dal tool possiamo notare una correlazione abbastanza buona tra simulazione e test sperimentale, a meno di differenze dovute alle differenti accensioni dell'ICE. Il contributo di P1 viene utilizzato principalmente per ricaricare la batteria ad alta tensione, quindi per coppia LPM, e l'energia recuperata dal P1 risulta circa la metà dell'energia utilizzata per l'avanzamento del veicolo. Si osserva inoltre una minor energia di propulsione in uscita dalla trasmissione dovuta ad un minor range elettrico nella prova sperimentale, causa delle diverse riaccensioni di cui si è parlato.

Questa differenza è dovuta, oltre alle differenti riaccensioni, al fatto che la stima delle friction dal modello ECU in vettura sovrastima leggermente rispetto alla simulazione. Tuttavia nel complesso i risultati ottenuti dalla divisione energetica appaiono abbastanza correlati, a meno delle differenze esposte, e risultano quindi validati dalle prove sperimentali.

Dall'esito delle prove sperimentali si possono dunque trarre alcune considerazioni importanti: la nuova strategia implementata in vettura permette di risparmiare in termini di consumo, come era stato previsto dalle simulazioni effettuate. Il vantaggio principale di questa strategia consiste nell'utilizzare l'ICE a maggior efficienza quando questo è acceso (quindi consumando leggermente di più durante le fasi a motore acceso per ricaricare la batteria) e dunque spegnere l'ICE per il maggior tempo possibile, quindi energeticamente significa risparmiare in termini di friction e pompaggio nei momenti in cui questo è spento: questo si traduce in un aumento di efficienza complessiva del powertrain durante le fasi a motore acceso, tramite ottimizzazione della coppia LPM.

6. Conclusioni

Questa attività è stata orientata principalmente all'ottimizzazione della strategia di controllo di un veicolo ibrido al fine di ottenere un maggiore risparmio di carburante e una riduzione delle emissioni. L'utilizzo di strategie di controllo, differenti per le due architetture, ha permesso di fare considerazioni riguardanti la gestione della potenza a bordo del veicolo per le due diverse architetture. Mediante analisi di simulazione si è evidenziata la diversa peculiarità delle due architetture nella gestione dei propulsori con il fine di valutare aspetti sia in termini di consumo, e quindi risparmio di combustibile da parte del motore termico per diverse funzionalità, ma soprattutto sulla gestione intelligente dei flussi di potenza, sul ruolo dei motori, la loro connessione e la dinamica del veicolo, cogliendo aspetti che possono essere utili per l'ottimizzazione dei veicoli ibridi.

Avendo a disposizione due diverse architetture è stato possibile effettuare un confronto tra le due, ma solamente in un ambiente virtuale (Simulink), dato che non sono state effettuate prove sperimentali su VF2 essendo ancora in fase prototipale. Dalle simulazioni effettuate si è potuto notare come il differente posizionamento dei motori elettrici è di fondamentale importanza per definire i vantaggi e i margini di miglioramento ottenibili.

Gli obiettivi sui quali ci si è concentrati per lo sviluppo di una strategia di controllo ottimizzata sono stati principalmente due: massimizzazione dell'efficienza in fase di ricarica e utilizzo ottimale dell'energia accumulata in batteria. Per massimizzare l'efficienza durante la ricarica si è cercato di evitare zone del piano quotato ad elevato consumo specifico, utilizzando una coppia LPM ottimale: in questo modo si utilizza l'ICE a carichi più elevati, quindi aumentando i consumi a motore acceso (dato che il consumo specifico è ricavato dal consumo diviso per la potenza), e la potenza aggiuntiva viene poi utilizzata per ricaricare la batteria; in questo modo avremo consumi maggiori a motore acceso ma la possibilità di spegnere prima e per più tempo l'ICE in modo da procedere in eDrive per un tempo maggiore: energeticamente corrisponde ad eliminare il consumo speso per le friction e per il pompaggio. Quindi il principale vantaggio di utilizzare una coppia LPM ottimale sta nel fatto che, aumentando l'efficienza globale del sistema, c'è la possibilità di spegnere prima il motore e quindi tenerlo acceso per un tempo minore.

Una differenza importante consiste nel diverso utilizzo dell'energia in batteria per le diverse architetture: data la presenza dei motori elettrici sull'assale su VF1, l'energia utilizzata da questi risulta nettamente più efficiente rispetto all'energia che utilizza VF2 durante la fase eDrive. Inoltre, anche durante la fase di recupero energetico si nota una minor efficienza del sistema VF2 dato che, durante le frenate rigenerative, quest'energia passa per la trasmissione mentre su VF1 viene recuperata direttamente dai motori elettrici sull'assale (a meno che per la coppia frenante richiesta non sia necessario anche l'intervento del motore elettrico P1).

Basti pensare al diverso flusso di potenza della coppia LPM per le due diverse architetture: durante il recupero non vi sono differenze dato che la posizione del motore elettrico è pressoché la stessa (a frizione chiusa è come se fossero nella stessa posizione); in fase di utilizzo di quest'energia, invece, vi è una differente catena di efficienza. Per VF1 l'energia rigenerata tramite coppia LPM viene attuata principalmente dai motori elettrici P4 sull'assale, mentre su VF2 quest'energia è utilizzata dallo stesso motore elettrico che l'ha generata; quindi durante l'utilizzo questa passa attraverso l'efficienza del cambio, rendendo molto più inefficiente il sistema complessivo. Per questo motivo si è deciso di ottimizzare l'utilizzo dell'energia immagazzinata in batteria per la vettura VF2 ottimizzando le cambiate durante le fasi in eDrive: in questo modo è stato possibile ottenere benefici dal punto di vista dei consumi ed inoltre, avendo aumentato l'efficienza complessiva durante la guida puramente elettrica, è aumentato anche il range elettrico.

Dai risultati ottenuti tramite simulazioni si è potuto confermare il minor vantaggio ottenibile dalle due diverse architetture: trasponendo la strategia ottimale per VF1 su VF2 non si sono ottenuti miglioramenti sensibili ed è stata necessaria un'ottimizzazione dedicata per la VF2.

Per la vettura VF1 è stato possibile validare i risultati ottenuti tramite simulazione dato che sono state effettuate diverse prove sperimentali che sono state messe a confronto in modo da ottenere valutazioni riguardanti la variabilità di quest'ultime e la correlazione con le prove simulate. Per la vettura VF2 invece non è stato possibile valutare dal punto di vista sperimentale le varie strategie dato che è un progetto ancora in fase di prototipazione. Confrontando i test sperimentali con le simulazioni si è osservata una buona correlazione

e una conferma sperimentale dei benefici sui consumi e quindi sulle emissioni introdotti con la nuova strategia. Inoltre con la nuova strategia implementata in vettura sono state effettuate prove su strada per valutare che le modifiche apportate non portassero ad un peggioramento lato guidabilità: i collaudatori che hanno testato questa strategia guidando su strada hanno confermato che le modifiche apportate non peggiorano la guidabilità; anzi, con la nuova strategia è stato dichiarato un miglior feeling alla guida della vettura. Essendo un veicolo che deve rispettare certe prerogative in termini di guidabilità e che deve garantire determinati standard in termini di prestazioni e velocità (requisito fondamentale dato che si tratta di una vettura ad alte prestazioni) è doveroso valutare questioni riguardanti il feeling di guida ogni qualvolta si presenti una modifica software.

La nuova strategia di controllo sviluppata ha permesso quindi non solo di ridurre consumi ed emissioni su ciclo omologativo ma anche di migliorarne la guidabilità: dunque i risultati ottenuti sono stati confermati ed è stato possibile omologare la vettura con una sensibile riduzione del valore su ciclo combinato, da dichiarare per omologare il veicolo. Dunque dai risultati raggiunti si può dire di aver garantito il soddisfacimento delle specifiche inizialmente imposte per il processo di ottimizzazione e anche requisiti commercialmente più favorevoli.



Figura 82 - SF90 stradale

Bibliografia

- L. Guzzella, A. Sciarretta, “*Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*”, Springer, 2013;
- S. Onori, L. Serrao, G. Rizzoni, “*Hybrid Electric Vehicles - Energy Management Strategies*”, Springer, 2016;
- Ellsworth P., Fraser R., Fowler M., VanLanen D. et al., “*Control Analysis for Efficiency Optimization of a High Performance Hybrid Electric Vehicle with Both Pre and Post Transmission Motors*”, SAE Technical Paper 2016-01-1253, 2016, doi: 10.4271/2016-01-1253;
- Dingel O., Ross J., Trivic I., Cavina N., Rioli M., “*Model-Based Assessment of Hybrid Powertrain Solutions*”, SAE Technical Paper 2011-24-0070, 2011, doi: 10.4271/2011-24-0070;
- Caramia, G., Cavina, N., Capancioni, A., Caggiano, M. et al., “*Combined Optimization of Energy and Battery Thermal Management Control for a Plug-in HEV*”, SAE Technical Paper 2019-24-0249, 2019, doi: 10.4271/2019-24-0249;
- McGehee J., Yoon H., “*An Optimal Powertrain Control Strategy for a Mild Hybrid Electric Vehicle*”, SAE Technical Paper 2013-01-0482, 2013, doi:10.4271/2013-01-0482;
- Meng, Y. and Currier, P., “*A System Efficiency Approach to Parallel Hybrid Control Strategies*”, SAE Technical Paper 2016-01-1156, 2016, doi: 10.4271/2016-01-1156;
- Pavlovic, J., Tansini, A., Fontaras, G., Ciuffo, B. et al., “*The Impact of WLTP on the Official Fuel Consumption and Electric Range of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Europe*”, SAE Technical Paper 2017-24-0133, 2017, doi: 10.4271/2017-24-0133;
- Bao, R., Baxter, J., and Revereault, P., “*Simulation Based Hybrid Electric Vehicle Components Sizing and Fuel Economy Prediction by Using Design of Experiments and Stochastic Process Model*”, SAE Technical Paper 2019-01-0357, 2019, doi: 10.4271/2019-01-0357.