

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA

in

MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA E PROPULSORI IBRIDI

**Sviluppo di un modello matematico per la valutazione della dinamica
longitudinale di un veicolo ibrido elettrico a 48 V**

CANDIDATO
Alessandro Franceschi

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Nicolò Cavina

CORRELATORE/CORRELATORI
Ing. Riccardo Parenti
Ing. Mario Basile
Ing. Stefano Mazzetti

Anno Accademico 2016/2017

Sessione III

Sommario

1	Introduzione	4
1.1	Abstract	4
2	Propulsione Ibrida.....	5
2.1	Principali Sfide Tecnologiche	5
2.2	Ibridizzazione	17
2.2.1	Architetture Ibride	18
2.2.2	Classificazione degli Ibridi	21
2.3	Confronto tra Batterie e Condensatori	24
2.4	Dimostratore 48 V	30
3	Analisi Software	33
3.1	ALPHA.....	34
3.2	QSS TB	36
3.3	ADVISOR	37
3.4	CO ₂ MPAS	38
3.5	Software Lamborghini.....	39
3.5.1	Analisi dei Risultati.....	42
4	Modalità Scambio Dati	46
4.1	Windchill.....	46
4.2	File di Interscambio.....	46
4.3	GIT HUB	47
5	Componenti Elettriche	48
5.1	Lithium Ion Capacitor	48
5.1.1	Struttura Modello LiC.....	53
5.2	Motore Elettrico e Inverter	56
5.2.1	Struttura Modello	58
5.3	Sistema Integrato.....	60
5.4	Strategia	62
5.5	Modelli Elettrici.....	64
6	Caratterizzazione Cambio Aventador.....	65
6.1	Descrizione Prova.....	65
6.1.1	Obiettivo.....	65
6.1.2	Svolgimento Prova	65

6.1.2	Schema Prova	66
6.2	Road Map Prova.....	67
6.2.1	Primo Breakpoint.....	67
6.2.2	Secondo Breakpoint.....	69
6.2.3	Terzo Breakpoint.....	70
6.2.4	Quarto Breakpoint	73
6.3	Conclusioni	74
6.3.1	Analisi dei Dati	77
6.4	Dettagli Modellazione	85
7	Ulteriori Modifiche e Sviluppi Futuri.....	88
7.1	CDS (Cylinder Deactivation System).....	88
7.2	Frizione.....	90
7.3	Sviluppi Futuri	91
8	Simulazioni Veicolo	92
8.1	Cambio	93
8.2	Componenti Elettriche	96
8.3	CDS (Cylinder Deactivation System).....	103
8.4	Cambiata Elettrica.....	105
8.5	Test Demo	108
8.6	Emissioni.....	110
9	Conclusioni	113
10	Lista delle Tabelle e delle Immagini	115
10.1	Lista delle Tabelle.....	115
10.2	Lista delle Immagini	116
11	Appendice.....	120
11.1	Appendice A: Codice MATLAB per i Dati di Input	120
11.2	Appendice B: Codice MATLAB per i Risultati di Output	127
12	Bibliografia.....	132

1 Introduzione

1.1 Abstract

La dinamica longitudinale costituisce un ambito di grande rilevanza nella simulazione dei veicoli. Permette di conoscere in maniera rapida le risposte al comportamento dinamico del sistema, oltre al consumo di combustibile e le performance longitudinali.

Una delle maggiori problematiche è costituita dalla quantità di dati di input necessari per garantire una simulazione accurata.

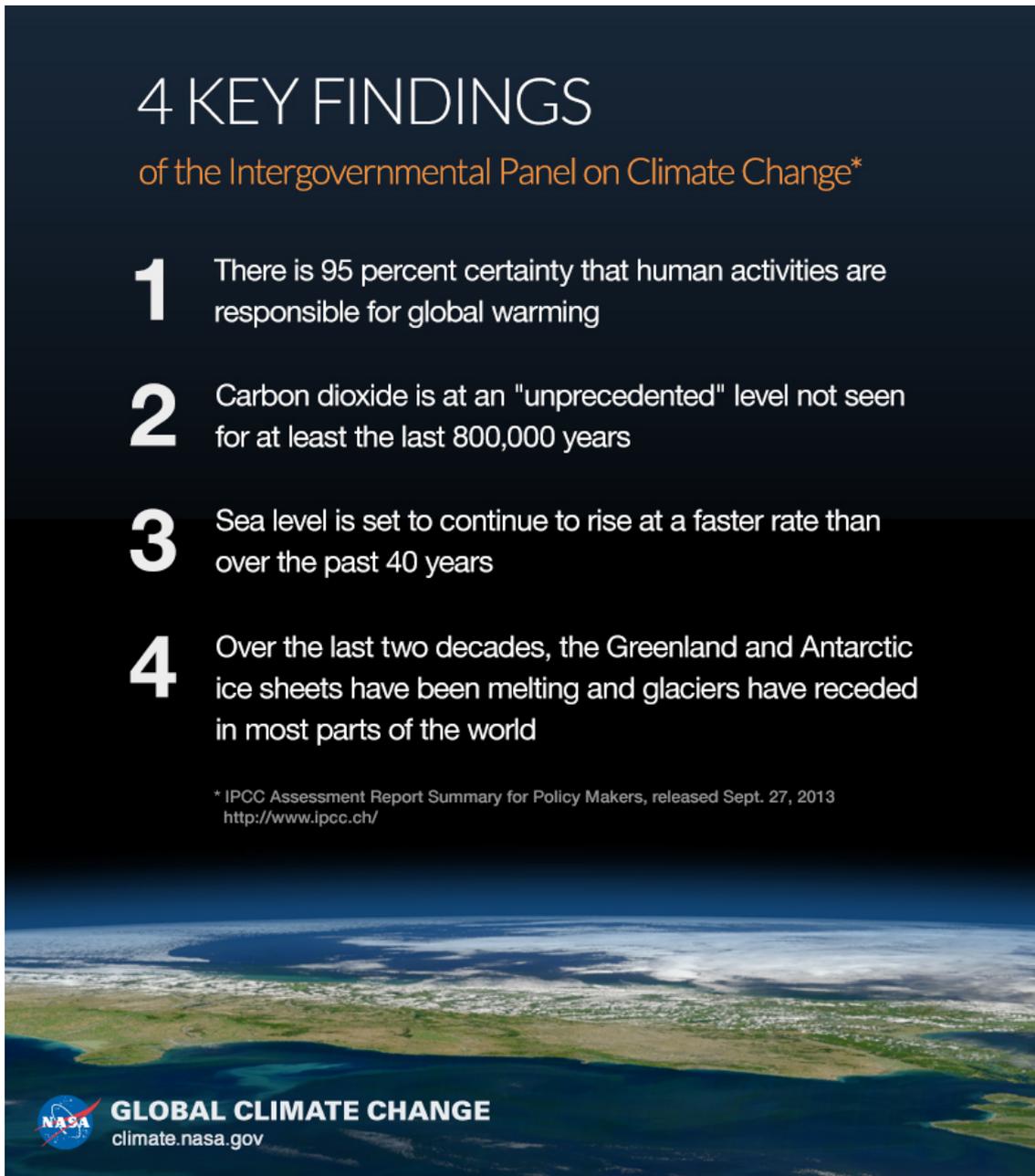
Questo documento si propone di descrivere l'attività di sviluppo di un modello matematico per la valutazione della dinamica longitudinale di un veicolo ibrido elettrico a 48 V. Descrive le modalità con cui l'attività è stata svolta e descrive le motivazioni che stanno dietro alle scelte effettuate più che rappresentare un manuale d'uso del modello stesso.

Il risultato finale è la validazione di un modello che permetta di simulare l'inserimento di componenti elettriche nel veicolo, oltre che simulare il comportamento di veicoli non esistenti in fase di concept e pre-concept, con particolare attenzione ai consumi di combustibile.



2 Propulsione Ibrida

2.1 Principali Sfide Tecnologiche



The infographic features a dark blue background with white and orange text. At the top, it reads '4 KEY FINDINGS of the Intergovernmental Panel on Climate Change*'. Below this, four numbered points are listed. At the bottom, there is a satellite image of Earth with the NASA logo and the text 'GLOBAL CLIMATE CHANGE climate.nasa.gov'. A small footnote at the bottom left of the text area provides the source: '* IPCC Assessment Report Summary for Policy Makers, released Sept. 27, 2013 http://www.ipcc.ch/'.

4 KEY FINDINGS

of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

- 1** There is 95 percent certainty that human activities are responsible for global warming
- 2** Carbon dioxide is at an "unprecedented" level not seen for at least the last 800,000 years
- 3** Sea level is set to continue to rise at a faster rate than over the past 40 years
- 4** Over the last two decades, the Greenland and Antarctic ice sheets have been melting and glaciers have receded in most parts of the world

* IPCC Assessment Report Summary for Policy Makers, released Sept. 27, 2013
<http://www.ipcc.ch/>

 **GLOBAL CLIMATE CHANGE**
climate.nasa.gov

Fig.1: NASA key findings.

Lo United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) è un trattato internazionale col principale obiettivo di prevenire o regolare l'impatto umano sulle risorse naturali. È stato adottato il 9 Maggio 1992 ed è entrato in vigore il 21 Marzo 1994.

L'obiettivo dell'UNFCCC è quello di [1]:

“stabilize greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with climate system”

Non vengono così imposte limitazioni sulle emissioni alle singole nazioni, ma si sostiene il fatto che particolari accordi ("protocols" o "Agreements") potrebbero essere negoziati in modo da definire azioni future al fine di raggiungere l'obiettivo fissato dall'UNFCCC.

L'esigenza di andare a definire documenti di questo tipo è dovuta al fatto che le attività umane hanno probabilmente contribuito nel corso del tempo ad un significativo incremento delle quantità di gas serra, incremento che comporta un fenomeno di riscaldamento della superficie terrestre e dell'atmosfera, che potrebbe avere effetti negativi sull'ecosistema naturale e sull'umanità.

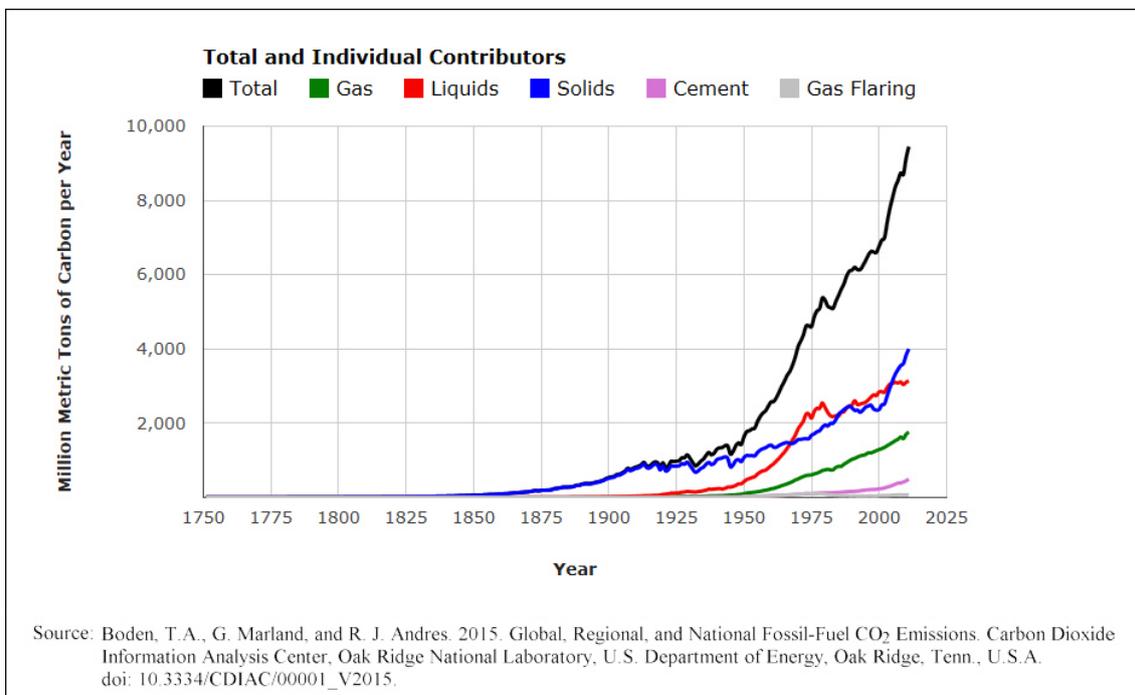


Fig.2: Contributors to the carbon production.

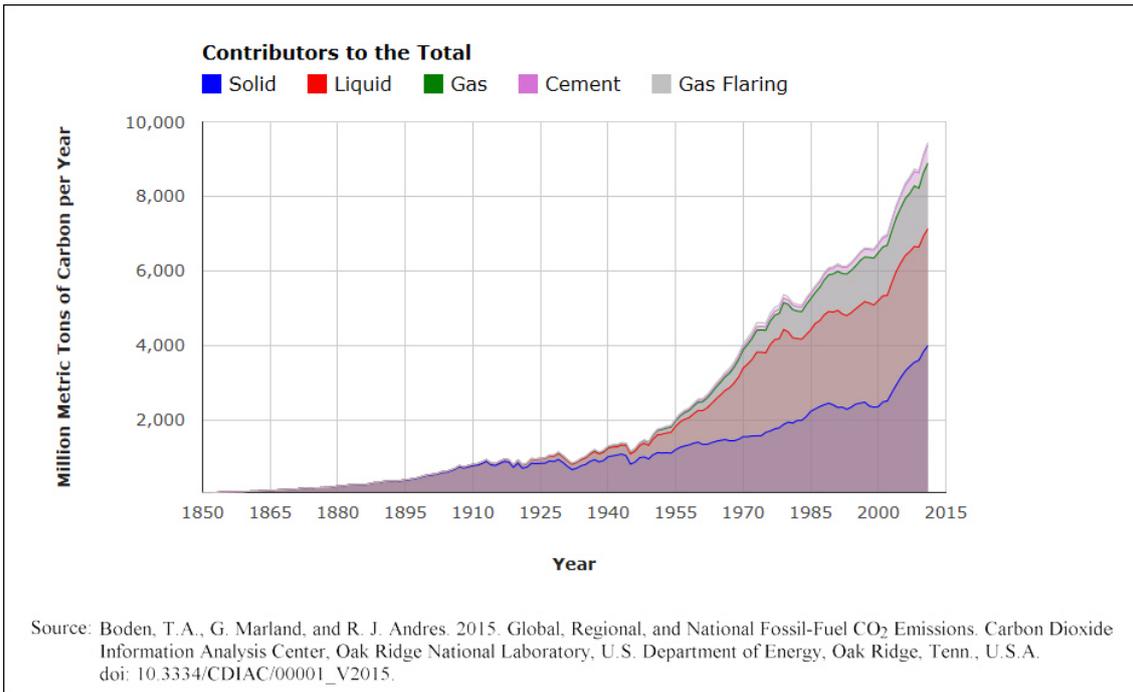


Fig.3: Total carbon production.

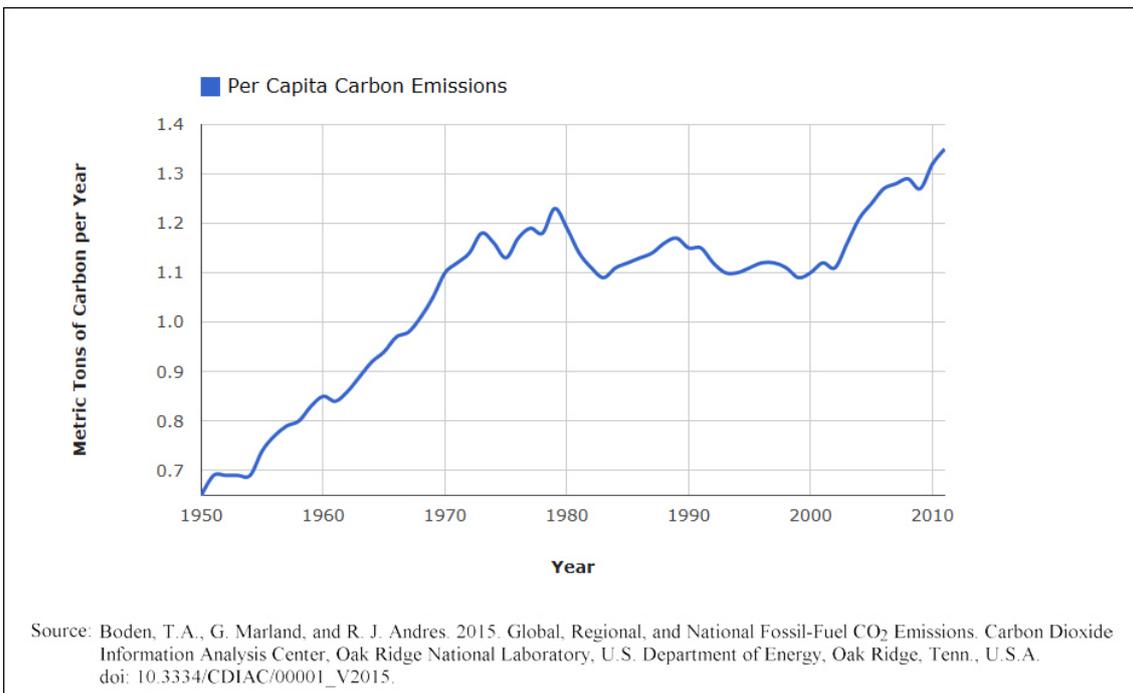


Fig.4: Per capita carbon emissions.

Dal 1751 oltre 400 miliardi di tonnellate di carbonio sono stati rilasciati in atmosfera dal consumo di combustibili fossili e dalla produzione di cemento. Metà di queste emissioni di CO₂ si sono verificate a partire dagli anni '80. La stima delle emissioni globali del 2014, 9855 milioni di tonnellate di carbonio,

rappresenta un massimo storico ed un aumento dello 0.8% rispetto alle emissioni del 2013. Il piccolo incremento continua un trend triennale di crescita (sempre sotto il 2%), questa modesta crescita è successiva ad un veloce recupero dalla crisi finanziaria del 2008-2009 che ha avuto conseguenze economiche e sull'impiego energetico a breve termine, in particolare nel Nord America ed Europa.

Globalmente, i combustibili liquidi e solidi partecipano al 75.1% delle emissioni derivanti dalla combustione di combustibili fossili e produzione di cemento nel 2014. La combustione di combustibili gassosi (cioè gas naturale) rappresenta il 18.5% (1823 milioni di tonnellate di carbonio) delle emissioni totali di combustibili fossili del 2014 e riflette un graduale incremento nell'utilizzo globale del gas naturale. Le emissioni dalla produzione di cemento (568 milioni di tonnellate di carbonio nel 2014) si sono duplicate nell'ultima decade e rappresentano ora il 5.8% delle emissioni globali di CO₂ rilasciate dai combustibili fossili e dalla produzione di cemento. La combustione di gas secondo "gas flaring", che rappresentava il 2% circa delle emissioni globali negli anni '70, ora rappresenta meno dell'1% dei rilasci di combustibili fossili a livello globale.[2]

Le nazioni aderenti all'UNFCCC si sono incontrate annualmente a partire dal 1995 al fine di stabilire i progressi con cui si sta facendo fronte al cambiamento climatico. Nel 1997 è stato approvato il Kyoto Protocol che stabilisce la riduzione dei gas serra per le nazioni aderenti all'UNFCCC e per il periodo 2008-2020.

Il 12 Dicembre 2015 è stato adottato il Paris Agreement, che regola le emissioni dal 2020 in poi. In accordo con l'articolo 20, l'Agreement è rimasto aperto per essere firmato dal 22 Aprile 2016 fino al 21 Aprile 2017 da parte di Stati e organizzazioni che sono parte della UNFCCC.

Ad Ottobre 2017, 195 membri UNFCCC hanno firmato l'Agreement, mentre 169 sono diventati parte dello stesso.

La UNFCCC divide le nazioni in tre diversi gruppi [3]:

- Annex I, include i paesi industrializzati che erano membri della OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) nel 1992, oltre ai paesi con economie di transizione detti EIT (Economies in Transition) Parties (tra cui la Federazione Russa, gli Stati Baltici, e molti Stati dell'Europa Centrale e dell'Est).
- Annex II, consiste dei membri OECD dell'Annex I, ma non i paesi EIT. E' richiesto che forniscano risorse finanziarie per permettere ai paesi in via

di sviluppo di svolgere attività di riduzione delle emissioni e per aiutarli ad adattarsi ai fenomeni avversi dovuti al cambiamento climatico. In aggiunta, tutti loro si impegnano a promuovere lo sviluppo e ad introdurre tecnologie “environmental friendly”.

- Non-Annex I, sono soprattutto paesi in via di sviluppo. Certi paesi sono riconosciuti dalla UNFCCC come particolarmente vulnerabili all’impatto del cambiamento climatico, altri sono più vulnerabili all’impatto economico delle misure adottate. La UNFCCC si impegna a soddisfare le speciali richieste di questi paesi.
- Sono presenti 49 paesi classificati come “Least Developed Countries” (LDCs), tenuti in particolare considerazione a causa della loro limitata capacità di rispondere al cambiamento climatico e di adattarsi ai suoi effetti. È necessario che le parti tengano conto della speciale situazione degli LDCs quando considerano operazioni di finanziamento e trasferimento di tecnologie.

L’1 Giugno 2017, il Presidente degli Stati Uniti, Donald Trump, ha annunciato che gli US interromperanno ogni genere di partecipazione nel Paris Agreement del 2015. Trump sostiene che il Paris Agreement danneggi l’economia degli Stati Uniti e che li ponga in una posizione di costante svantaggio, dunque, in accordo con la politica dell’America First, Trump ha asserito che il ritiro dal Paris Agreement potrà aiutare i lavoratori e l’economia americana.

La prima data disponibile per il ritiro degli US è il 4 Novembre 2020, quattro anni dopo l’entrata in vigore dell’Agreement, finché il ritiro non avrà effetto gli Stati Uniti sono obbligati ad adempiere ai propri doveri e dovranno continuare a riportare le proprie emissioni alle United Nations.

Il successo del 2015 nell’adozione del Paris Agreement era strettamente legato alla disponibilità mostrata dagli Stati Uniti, e dall’allora Presidente Barack Obama, e dalla Cina. Questi due paesi rappresentano i principali produttori di CO₂ e la loro collaborazione aveva segnato la buona riuscita dell’accordo.

Nonostante la decisione del Presidente Trump, negli Stati Uniti l’industria automobilistica come anche le compagnie aeree continueranno ad impegnarsi nella produzione di mezzi di trasporto che si adeguino ai limiti stabiliti sulle emissioni. Questa scelta trova le proprie motivazioni nel risparmio economico che può essere ottenuto riducendo i consumi di carburante e nel rispetto delle regole di omologazione di altri Stati.

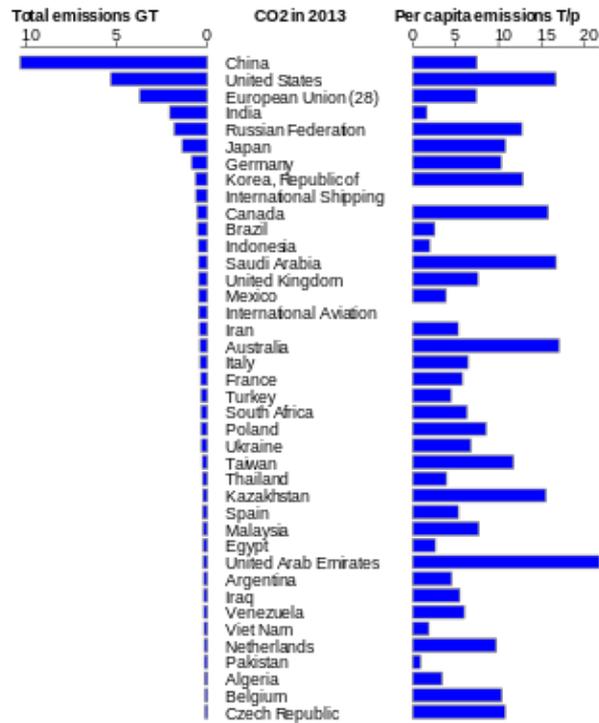


Fig.5: Carbon dioxide emissions for the top 40 countries by total emissions in 2013, given as totals and per capita. [4]

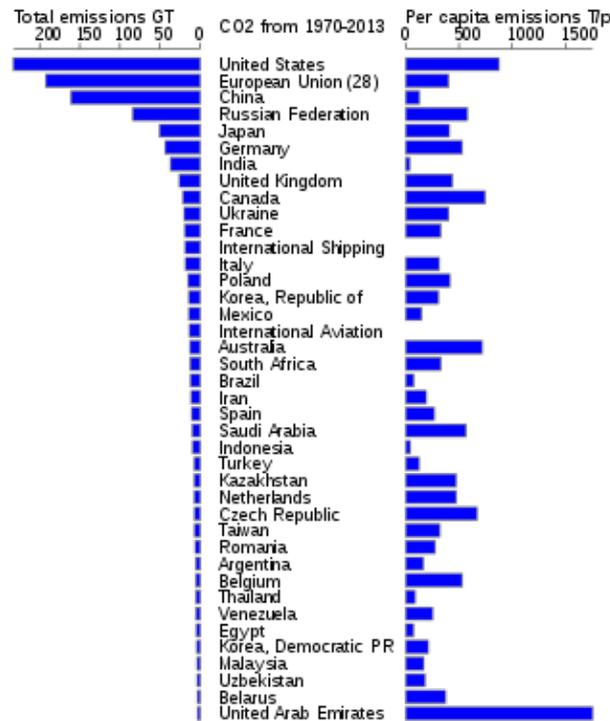
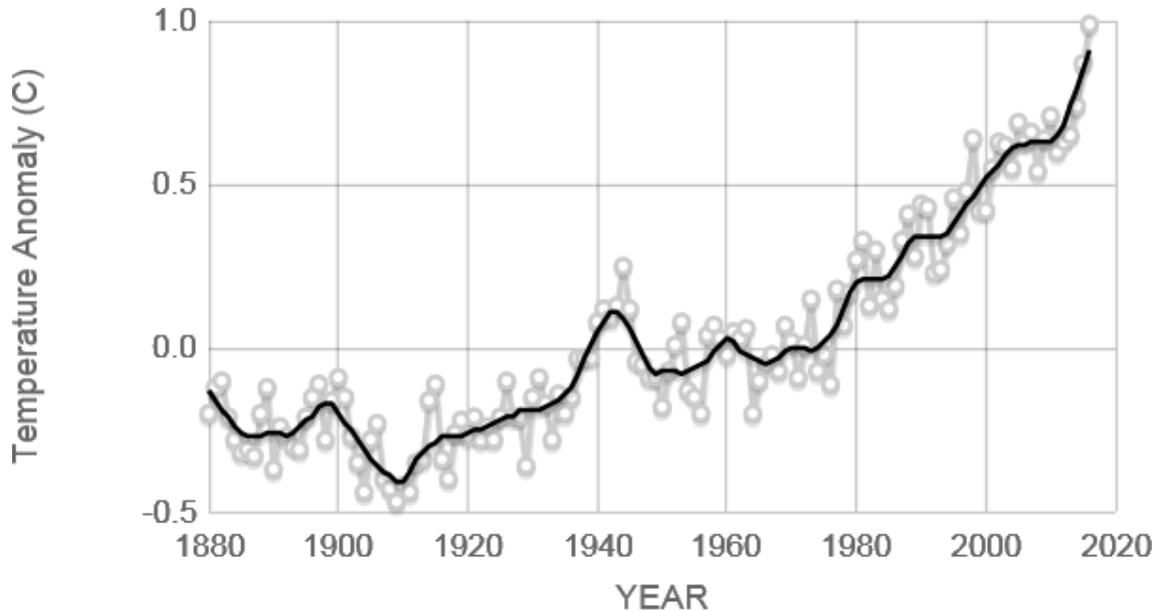


Fig.6: The cumulative CO2 emissions between 1970 and 2013 from the top 40 countries in the world, including some extra-national bodies. The data comes from the EU EDGAR database. [4]

Secondo il Paris Agreement ogni nazione determina, pianifica e riporta regolarmente il contributo che dovrebbe garantire per ridurre il riscaldamento globale. Non esistono meccanismi per definire un target specifico da rispettare in date definite, ma ogni target è necessario sia migliorativo rispetto al precedente.



Source: climate.nasa.gov

Fig.7: Temperature anomaly during years. [5]

Riporto di seguito alcuni importanti tratti del Paris Agreement [6]:

“Article 2

1. This Agreement, in enhancing the implementation of the Convention, including its objective, aims to strengthen the global response to the threat of climate change, in the context of sustainable development and efforts to eradicate poverty, including by:

(a) Holding the increase in the global average temperature to well below 2°C above pre-industrial levels and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5°C above pre-industrial levels, recognizing that this would significantly reduce the risks and impacts of climate change;

(b) Increasing the ability to adapt to the adverse impacts of climate change and foster climate resilience and low greenhouse gas emissions development, in a manner that does not threaten food production; and

(c) Making finance flows consistent with a pathway towards low greenhouse gas emissions and climate-resilient development.

2. This Agreement will be implemented to reflect equity and the principle of common but differentiated responsibilities and respective capabilities, in the light of different national circumstances.”

“10. Each Party should, as appropriate, submit and update periodically an adaptation communication, which may include its priorities, implementation and support needs, plans and actions, without creating any additional burden for developing country Parties.”

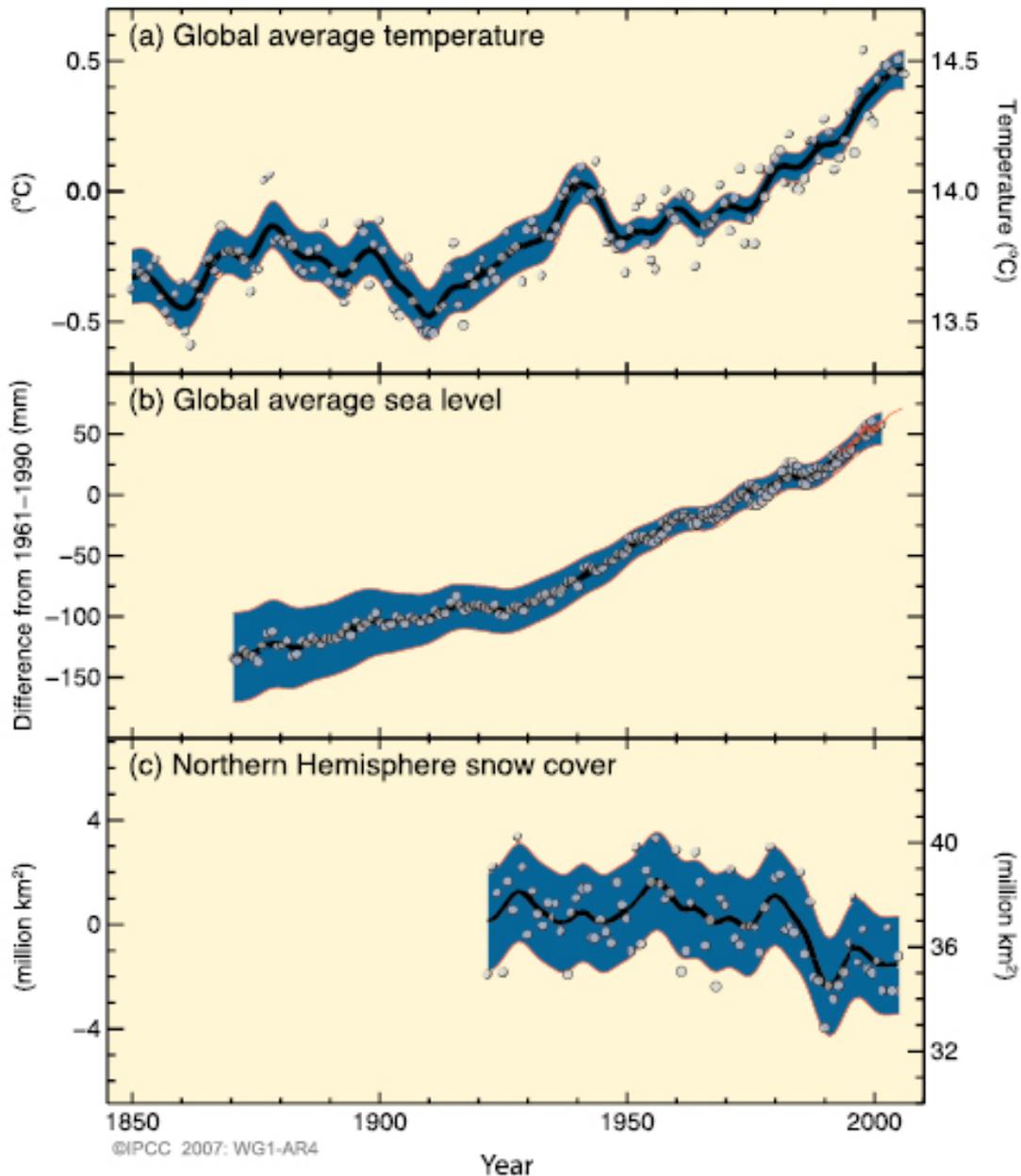


Fig.8: Climate differences between 1961-1990.

Il settore dei trasporti produce circa un quarto delle emissioni di gas serra globali legate alla produzione di energia. Conseguentemente è necessario che tale settore contribuisca in maniera attiva a rispettare gli obiettivi stabiliti,

secondo cui il riscaldamento globale deve essere limitato ad un incremento della temperatura inferiore ai 2°C rispetto ai livelli di temperatura pre-industriali.

Al fine di ridurre le emissioni dei trasporti (in particolare nel settore automotive) si può pensare di impiegare diverse tecnologie quali la propulsione elettrica o ibrida.

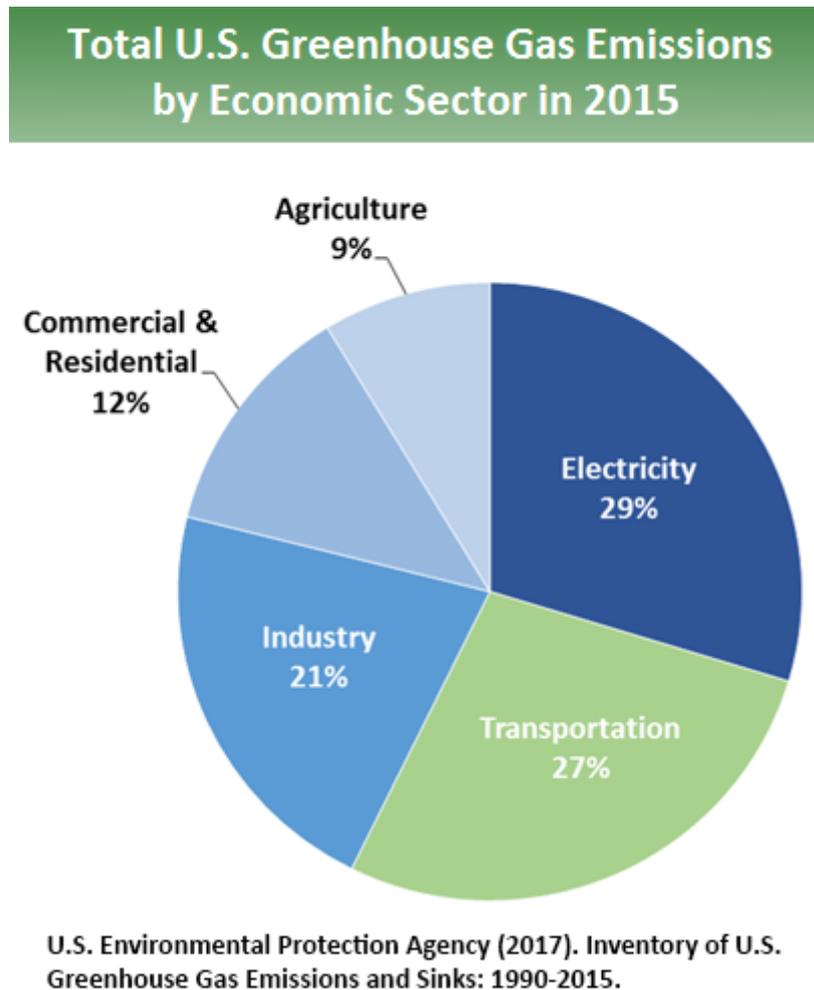


Fig.9: Greenhouse gas emissions. [7]

- Produzione elettrica (29% delle emissioni del 2015). Indicativamente il 67% dell'elettricità prodotta deriva dalla combustione di combustibili fossili, prevalentemente carbone e gas naturale.
- Trasporti (27% delle emissioni del 2015). Le emissioni associate ai trasporti derivano dai combustibili fossili per l'utilizzo di vetture, camion, navi, treni ed aeroplani. Oltre il 90% dei combustibili usati per i trasporti è basato sul petrolio, includendo diesel e benzina.
- Industria (21% delle emissioni del 2015). Le emissioni provengono principalmente dalla combustione di combustibili fossili per la produzione

di energia, oltre che da alcune reazioni chimiche necessarie per produrre beni da materiali grezzi.

- Commerciale e residenziale (12% delle emissioni del 2015). Le emissioni derivano dalla combustione per riscaldamento, dall'uso di certi prodotti che contengono gas serra e dal trattamento dei rifiuti.
- Agricoltura (9% delle emissioni 2015). Le emissioni vengono prodotte dal bestiame (ad esempio bovini), dalla produzione agricola e dalla produzione di riso.
- Utilizzo dei terreni e delle foreste (offset dell'11,8% delle emissioni del 2015). Vaste aree terrestri possono comportarsi come pozzi (assorbendo CO₂ dall'atmosfera) o come sorgenti di gas serra. Dal 1990, negli USA, terre e foreste controllate hanno assorbito più CO₂ di quanta ne abbiano emessa.

Il settore dell'elettricità coinvolge la generazione, trasmissione e distribuzione dell'elettricità. La CO₂ rappresenta la principale delle emissioni di gas serra del settore, ma vengono emessi minori quantità di CH₄ e N₂O. I gas vengono rilasciati durante la combustione dei combustibili fossili come carbone, oli o gas naturale.

Il settore dei trasporti include la movimentazione di persone e beni via automobile, camion, nave, aeroplano o altri veicoli. La maggior parte delle emissioni è data dalla CO₂ derivante dalla combustione di combustibili basati sul petrolio, come benzina o diesel, nei motori a combustione interna.

Dal consumo di combustibili vengono generate piccole quantità di CH₄ e N₂O, oltre ad HFC. Queste ultime sono legate all'utilizzo di aria condizionata e trasporti refrigerati.

Il settore dell'industria produce beni e materiali grezzi che usiamo ogni giorno. Le emissioni vanno divise in due categorie: dirette, prodotte dalla fabbrica, e indirette, che avvengono lontano dal sito della fabbrica, ma che sono legate all'utilizzo energetico della fabbrica stessa.

Le emissioni dirette derivano dal combustibile bruciato per produrre energia o calore, attraverso reazioni chimiche derivanti da processi industriali. La maggior parte dei gas emessi deriva dal consumo dei combustibili per la produzione di energia. Una quantità minore, al massimo un terzo, deriva da perdite di gas naturali e di petrolio, dall'utilizzo di particolari combustibili in produzione (ad esempio prodotti a base di petrolio per plastiche), e reazioni per la produzione di sostanze chimiche, ferro e acciaio e cemento.

Le emissioni indirette derivano dalla combustione di combustibili negli stabilimenti per la produzione di elettricità, che viene poi impiegata per il funzionamento dei macchinari nelle fabbriche.

Il settore residenziale e commerciale include le case e gli edifici adibiti a scopi commerciali (escludendo l'agricoltura e le industrie). Le emissioni per questo settore sono dirette, per la combustione associata al riscaldamento e alla cottura, il trattamento dei rifiuti e delle acque di scarico, e dalle perdite dei liquidi frigoriferi. Le emissioni indirette sono associate all'utilizzo di elettricità.

Le emissioni dirette sono prodotte da attività residenziali e commerciali mediante varie modalità:

- La combustione di gas naturale e derivati del petrolio per riscaldamento e cottura porta ad emissioni di CO₂, CH₄, N₂O. Le emissioni derivanti dal consumo di gas naturali rappresentano circa il 76% delle emissioni dirette di CO₂ di questo settore. Il consumo di carbone è una componente di minore rilevanza.
- I rifiuti inviati in discarica emettono CH₄.
- Il trattamento delle acque di scarico produce CH₄ e N₂O.
- I gas refrigeranti impiegati per aria condizionata e sistemi di refrigerazione possono essere rilasciati durante il funzionamento o a causa di perdite.

Le emissioni indirette sono prodotte dalla combustione di combustibili fossili negli stabilimenti per la produzione di elettricità, che viene utilizzata per l'illuminazione o altre applicazioni.

Le attività agro colturali, la coltura e l'allevamento di bestiame, contribuiscono in vari modi alle emissioni:

- Varie pratiche sui terreni agricoli possono portare ad una crescita dell'azoto nel suolo e portare ad emissioni di N₂O. Attività specifiche che contribuiscono alle emissioni di N₂O dai terreni agricoli includono l'applicazione di fertilizzanti sintetici e organici, il drenaggio di terreno organico e pratiche di irrigazione. La gestione dei terreni porta alla generazione di più della metà delle emissioni dal settore agricolo.
- Il bestiame, soprattutto i ruminanti come i bovini, producono metano (CH₄) come parte del normale processo digestivo. Questo rappresenta almeno un terzo delle emissioni del settore agricolo.
- Le modalità con cui viene gestito il letame contribuiscono a generare CH₄ e N₂O. Diverse modalità di trattamento e immagazzinaggio

comportano diverse emissioni. La gestione del letame rappresenta il 15% delle emissioni totali del settore agricolo.

- La coltivazione di riso produce CH₄ e la combustione dei residui di coltura produce CH₄ e N₂O.

Le piante assorbono CO₂ dall'atmosfera quando crescono e conservano parte di questo carbonio per tutta la loro vita. Anche le coltivazioni possono accumulare carbonio da queste piante a seconda della loro gestione e di altre condizioni atmosferiche. Questo accumulo biologico assorbe CO₂ dall'atmosfera, quindi viene definito "pozzo" delle emissioni. Emissione o assorbimento di CO₂ possono avvenire a seconda di come cambia l'utilizzo dei terreni. Per esempio se un terreno coltivabile viene destinato al pascolo, o se nuovi terreni vengono coltivati, o se le foreste crescono. Inoltre se impieghiamo componenti biologiche per la produzione di elettricità, per creare combustibili liquidi o per costruire, possiamo generare emissioni o assorbimento.

Negli Stati Uniti, dal 1990, la gestione dei terreni e delle foreste ha portato ad un assorbimento della CO₂ dall'atmosfera maggiore delle emissioni. Per questo motivo, il settore Land Use, Land-Use Change, and Forestry (LULUCF) è considerato un pozzo, piuttosto che una sorgente di CO₂. In tante aree del mondo, è vero l'opposto, in particolare in paesi dove avviene una forte deforestazione, spesso per motivi agricoli o per insediamenti. In queste situazioni, il settore LULUCF può essere una sorgente di emissioni. [8]

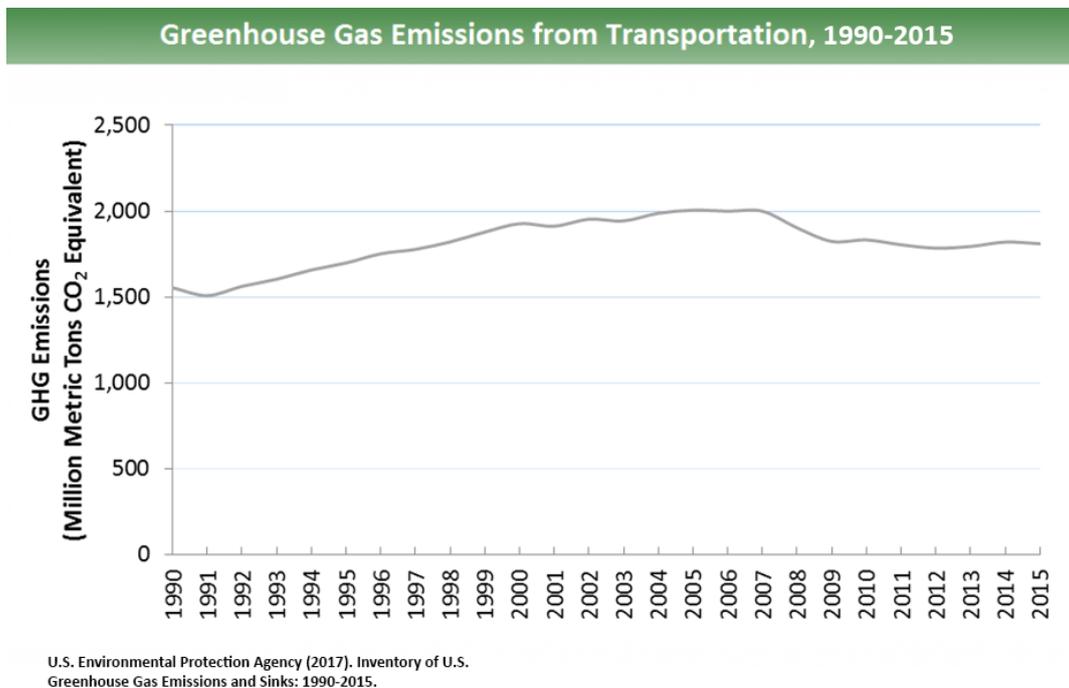


Fig. 10: Emissions from transportation.

2.2 Ibridizzazione

Un veicolo ibrido è un veicolo che sfrutta due o più distinte sorgenti di potenza per muovere il veicolo stesso. Il termine ibrido elettrico si riferisce agli HEVs (Hybrid Electric Vehicles), che combinano un motore a combustione interna ad uno o più motori elettrici.

Il termine ibrido si può riferire però anche a ibridi meccanici, a celle di combustibile, idraulici, pneumatici...a seconda della diversa sorgente di potenza a cui si sta facendo riferimento.

La scelta di impiegare soluzioni ibride ha sempre rappresentato nella storia una soluzione volta a combinare due diverse tecnologie al fine di superarne i limiti. Gli ibridi sono il risultato di una situazione in cui una vecchia tecnologia ha necessità di essere supportata, mentre una nuova tecnologia non è ancora abbastanza matura da imporsi in maniera autonoma.

Oggi la necessità di ridurre i gas serra è molto forte e il settore dell'automotive è ampiamente interessato a questo aspetto. Le emissioni di CO₂ sono infatti comuni a tutti i veicoli a combustione interna e partecipano al riscaldamento globale.

È in questo panorama che si è inserita la possibilità di adottare delle soluzioni ibride per i trasporti, poiché potrebbero contribuire in maniera significativa alla riduzione delle emissioni di gas serra mediante soluzioni ad esempio di "Downsizing" e "Load Point Shift".

La pratica del "Downsizing" prevede una riduzione della cilindrata e del numero dei cilindri, ricorrendo poi alla sovralimentazione per riportare la potenza massima sviluppata al valore desiderato. Il controllo del rapporto di sovralimentazione al variare del carico, consente di far lavorare più a lungo il motore nella parte alta del suo campo di utilizzo, dove si hanno rendimenti globali più alti. Ne deriva il vantaggio di una diminuzione dei consumi di combustibile ai carichi parziali e, nello stesso tempo, una riduzione del peso e dell'ingombro del motore.

Lo stesso effetto può essere ottenuto grazie all'introduzione di batterie e macchine elettriche al posto del sistema di sovralimentazione.

Il "Load Point Shift" prevede di andare a spostare il punto di funzionamento del motore a combustione interna nella zona in cui il consumo di combustibile assume i migliori valori possibili, grazie al contributo di coppia che viene garantito dal sistema elettrico. Modalità tipiche di funzionamento in "Load Point

Shift” sono date da: spegnimento del motore al minimo, spegnimento del motore a bassa richiesta di coppia nel caso in cui lo stato di carica della batteria sia sufficientemente alto, ricarica della batteria a SoC basso mediante il motore a combustione interna a fronte di una bassa richiesta di coppia alle ruote. [9]

D'altra parte, l'ibrido presenta dei limiti, quali i costi elevati dei componenti elettrici, il peso e il packaging, i sistemi di controllo più complessi, l'affidabilità.

2.2.1 Architetture Ibride

Esistono diverse soluzioni ibride adottabili che si differenziano in base alle modalità con cui avviene lo scambio energetico tra le varie parti costituenti il veicolo.

Il sistema in parallelo permette di effettuare una somma delle coppie derivanti dal motore a combustione interna e dalla macchina elettrica prima o dopo il sistema di trasmissione, entrambe le sorgenti partecipano alla guida delle ruote.

Il sistema in serie presenta una guida delle ruote effettuata unicamente mediante la macchina elettrica, il motore a combustione interna è collegato ad un generatore che potrà scambiare energia con la macchina elettrica stessa.

Il power-split rende possibile contemporaneamente una soluzione in serie ed in parallelo, è una soluzione adottata ad esempio nella Toyota Prius.

La series-parallel può trasformarsi in un sistema in serie o in parallelo a seconda di quali frizioni vengano aperte o chiuse. [10]

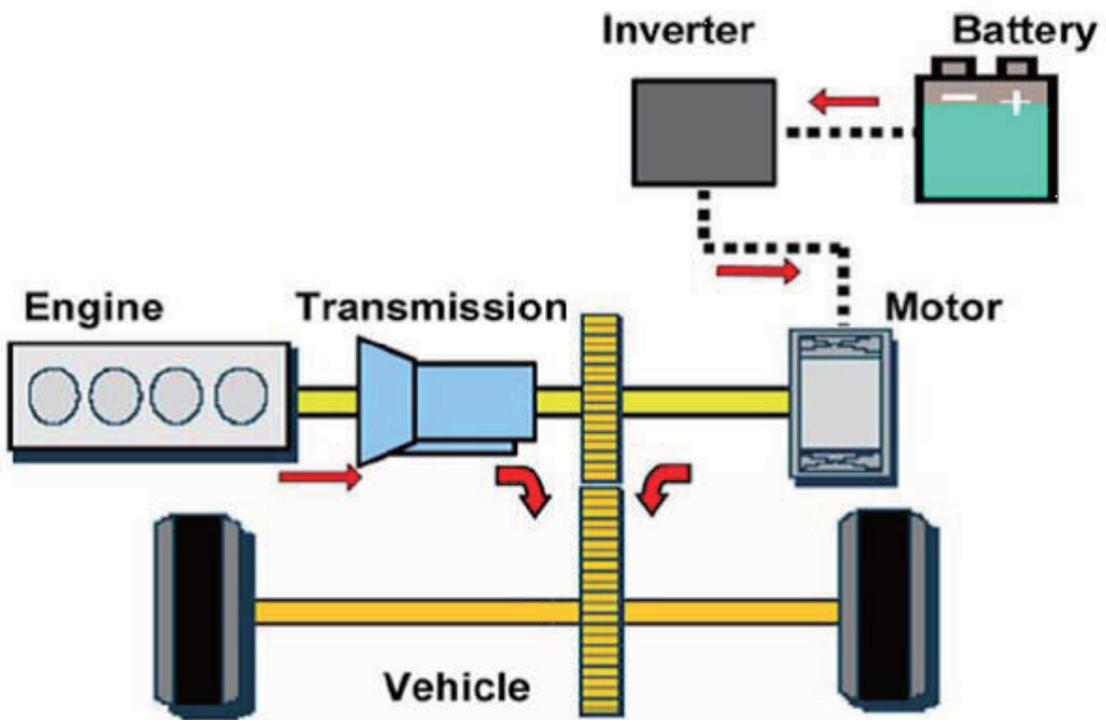


Fig.11: Parallel hybrid scheme.

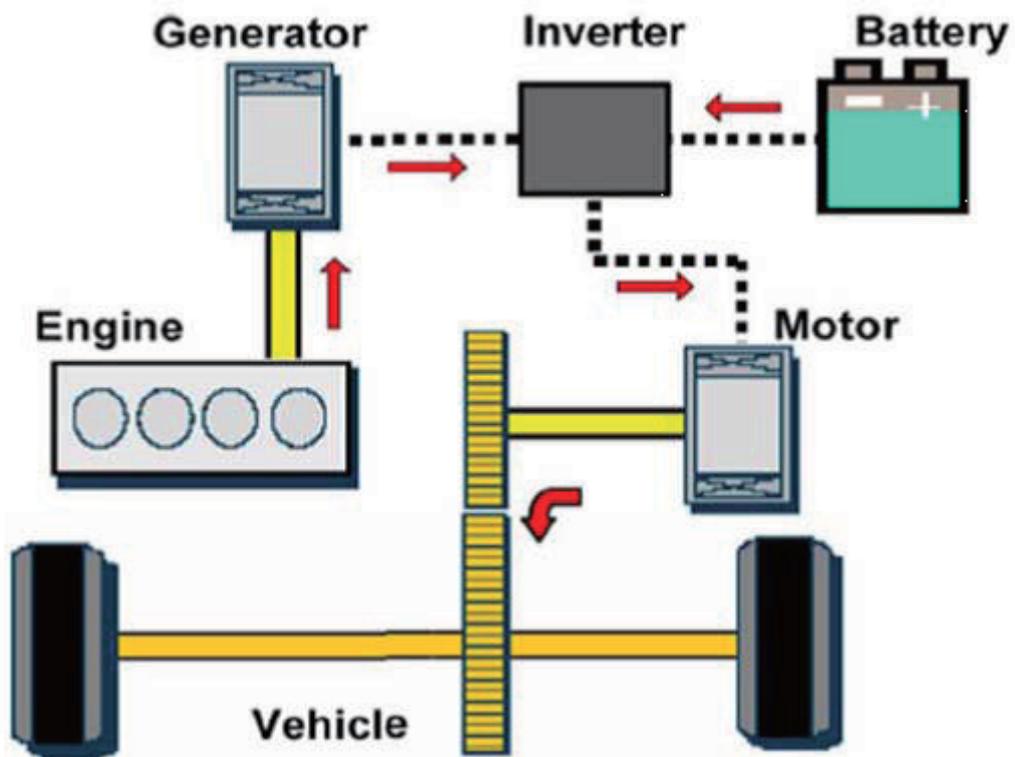


Fig.12: Series hybrid scheme

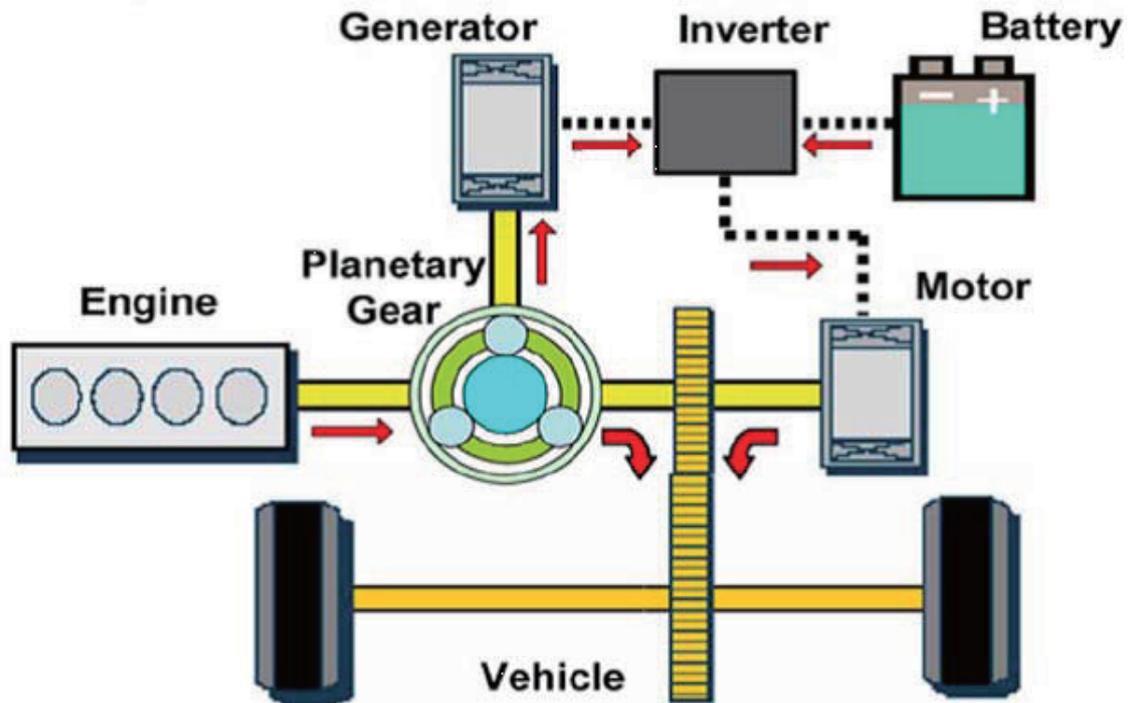


Fig.13: Combined hybrid scheme (power-split).

Per quanto riguarda la soluzione in parallelo, è poi possibile definire più nel dettaglio le caratteristiche del veicolo in base alla posizione della macchina elettrica, ciò che ci interessa sono le posizioni:

- P0, dove la macchina è collegata direttamente al motore, tipicamente mediante cinghia.
- P1, dove la macchina è collegata tra motore e primario del cambio, ma può essere scollegata dal cambio e avviare il motore stesso senza portarsi dietro altre inerzie.
- P2, dove la macchina è collegata all'albero primario del cambio e può essere staccata dal motore in modo da eliminare le perdite parassite del motore stesso.
- P3a, dove la macchina è collegata all'albero secondario del cambio.
- P3b, dove la macchina è collegata al differenziale e scollegata rispetto al motore a combustione interna.

La classificazione appena fornita costituisce uno standard diffuso nel campo automobilistico, ma non rappresenta una soluzione unica. In particolare, spesso non si ricorre all'attribuzione di una sigla alfanumerica, ma ci si limita ad indicare la posizione relativa della macchina elettrica rispetto alla trasmissione.

[11]

2.2.2 Classificazione degli Ibridi

	Function				
	Stop&start	Electric traction	Regenerative braking	Electric driving only	External battery charge
System					
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)

Table 1: Hybrid classification. [10]

Gli ibridi possono essere classificati in base alla tipologia di batteria che montano ed in base alle funzionalità che queste soddisfano.

Partendo dal veicolo convenzionale che permette solo in alcuni casi la funzionalità di Start&Stop, si può arrivare a veicoli dotati di un powertrain capace di svolgere dei cicli di guida basati unicamente su una sorgente elettrica.

I veicoli definiti Mild-Hybrid solitamente rendono possibili funzionalità quali lo Start&Stop, la frenata rigenerativa e, in parte, la trazione elettrica in modo da ridurre le emissioni aiutando il motore a combustione interna, ma senza riuscire a garantire trazione che sia unicamente elettrica.

Soluzioni Mild-Hybrid sono ad esempio state adottate da Honda, Mercedes e BMW.

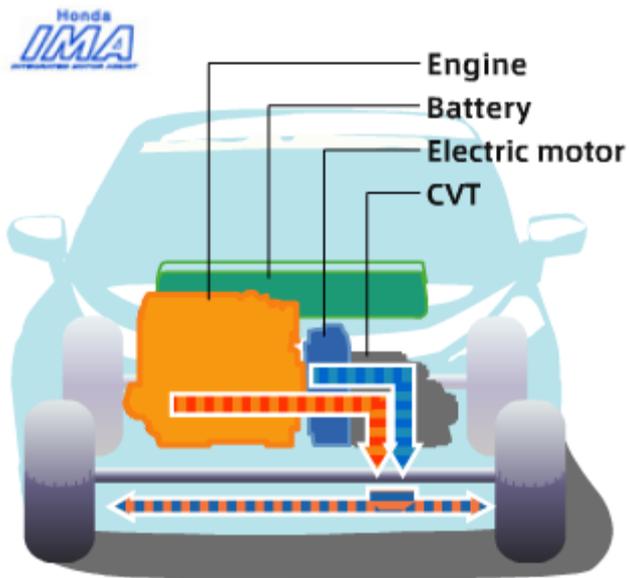


Fig.14: Honda Integrated Motor Assist. [12]

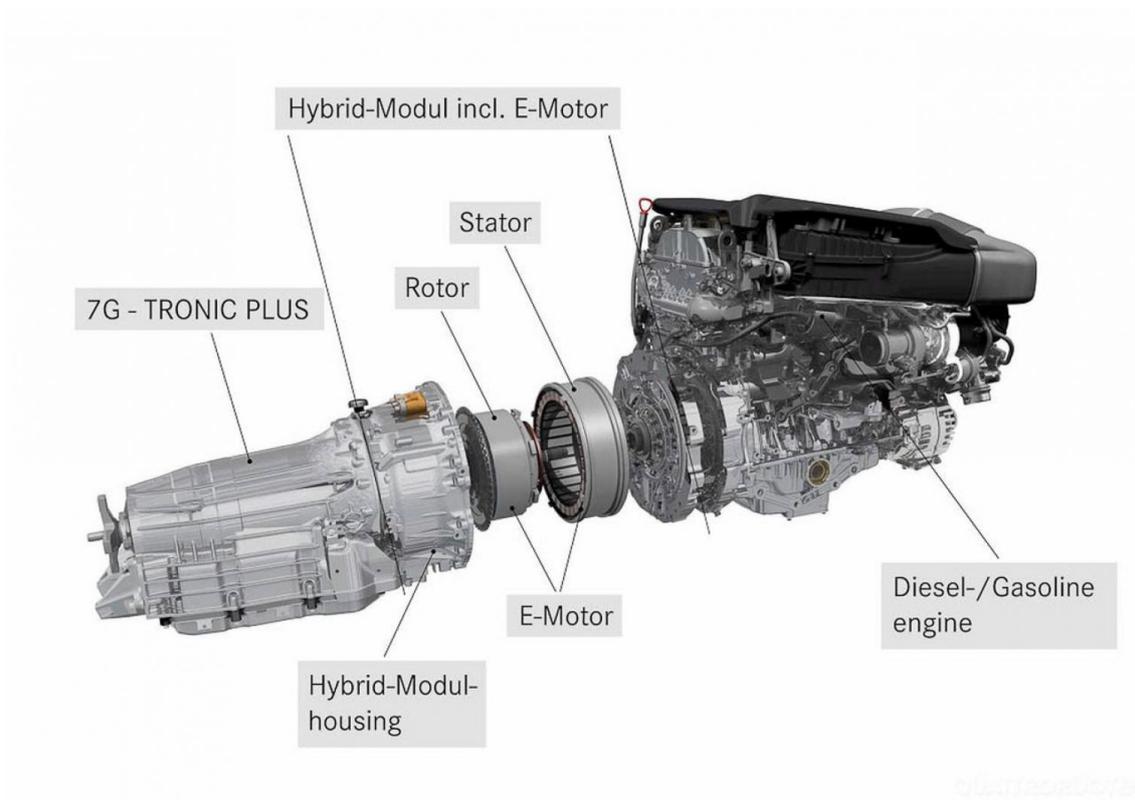


Fig.15: Mercedes S-Class.[13]

Si segnalano anche altre implementazioni relative al 48 Volt. [14]

Audi ha da poco annunciato l'adozione del sistema mild-hybrid a 48 Volt come sistema elettrico primario, la nuova A8 presenterà come standard un drivetrain elettrificato e sarà la prima nella storia del brand.

Anche Daimler sta investendo in maniera significativa nell'elettrico, infatti ha messo le basi per la nascita di una delle più grandi e moderne fabbriche di batterie agli ioni di litio. D'altro canto la nuova S-class lanciata nel 2017 monta un sistema di potenza a 48 Volt.

Esistono anche vari fornitori che si stanno impegnando nello sviluppo di sistemi a 48 Volt, come Valeo che ha già sviluppato compressori elettrici che permettono operazioni di downsizing del motore. Una volta accoppiati con i sistemi Valeo, possono ridurre il consumo di combustibile di un veicolo del 15-20% (*). [15]

Un altro sviluppatore è Delphi, che nel 2016 ha lanciato la sua tecnologia ibrida a 48 Volt. Il sistema dispone di un e-charger e può migliorare i consumi di carburante in maniera significativa.

Continental ha esposto la sua tecnologia a 48 Volt mild-hybrid al IAA Frankfurt nel 2017, questa può essere implementata con veicoli diesel o a benzina. Le versioni a 48 Volt diesel lanciate da Renault (Scenic e Grand Scenic) si basano sulle conoscenze di Continental.

(*) L'utilizzo di valori percentuali è applicabile perché riferito ad un modello di veicolo standard, con emissioni di CO₂ stimabili circa a 100 g/km, ma nel nostro caso non può essere considerato affidabile. Per esempio, la stima di energia recuperabile si aggira intorno ai 250÷350 W, che corrispondono a 6÷8 g/km di CO₂. Questo dato è assoluto e va rapportato ai 350 g/km tipicamente emessi da una vettura Lamborghini, portandoci ad una percentuale decisamente diversa.

2.3 Confronto tra Batterie e Condensatori

Al fine di comprendere le scelte effettuate da Lamborghini, è necessario individuare le principali caratteristiche di batterie e condensatori. [16]

Le batterie elettrochimiche sono dei componenti chiave nei veicoli elettrici e in quelli ibridi. Trasformano energia chimica in energia elettrica e viceversa.

Le batterie per impieghi di trazione sono caratterizzate innanzitutto in termini di potenza, che deve corrispondere alla potenza del circuito elettrico, e in termini di capacità nominale, che deve soddisfare le richieste di autonomia. L'ultima, espressa solitamente in Ah, è l'integrale della corrente che può essere erogata da una batteria piena quando si scarica completamente sotto certe condizioni di riferimento. A tal proposito è possibile definire un parametro di velocità di carica e scarica della batteria chiamato "C-rate". [17]

La capacità di una batteria è comunemente considerata 1C, che significa che una batteria completamente carica a 1Ah dovrebbe garantire 1A per un'ora. La stessa batteria che si scarica a 0.5C dovrebbe garantire 500mA per due ore, a 2C garantisce 2A per 30 minuti. Le perdite riducono il tempo di scarica durante le scariche veloci e condizionano anche la durata.

Una C-rate di 1C è definita "one-hour discharge", 0.5C o C/2 è una "two-hour discharge" e 0.2C o C/5 è una "5-hour discharge". Alcune batterie per alte performance possono essere caricate e scaricate sopra 1C con stress moderato. In tabella i tempi tipici a diverse C-rate.

C-rate	Time
5C	12 min
2C	30 min
1C	1h
0.5C or C/2	2h
0.2C or C/5	5h
0.1C or C/10	10h
0.05C or C/20	20h

Table 2: C-rate and service times when charging and discharging batteries of 1Ah (1,000mAh).

Un parametro adimensionale è lo “State of Charge” (SoC), che descrive la capacità rimanente nella batteria, espressa come percentuale della capacità totale.

Le batterie sono dotate di due elettrodi di composizione chimica diversa, immersi in un elettrolita e separati da una membrana. La membrana permette il passaggio di ioni di dimensioni ridotte, che vengono a formarsi nel caso in cui gli elettrodi siano collegati attraverso un circuito elettrico esterno. Tale circuito rende possibile il passaggio di elettroni prodotti mediante reazioni di ossidoriduzione. Viene definito anodo l'elettrodo dove prende luogo l'ossidazione (perdita di elettroni). Viene definito catodo l'elettrodo dove prende luogo il processo di riduzione (acquisizione di elettroni).

Le batterie impiegate nel settore automotive sono tutte ricaricabili (definite del secondo tipo). Possono essere divise in due categorie a seconda della tipologia di elettrolita adottato, le batterie che lavorano a temperatura ambiente utilizzano un elettrolita acquoso o non acquoso, quelle ad alta temperatura un elettrolita solido o fuso.

Esistono più di 10 diverse tecnologie, le più comuni sono:

- Piombo acido.
- Idruro di nickel metallico.
- Litio, tra cui ioni di litio e polimero di litio metallico.
- Sali fusi, tra cui cloruro di nickel-sodio.
- Aria-metallo, tra cui aria-litio e zinco-aria.

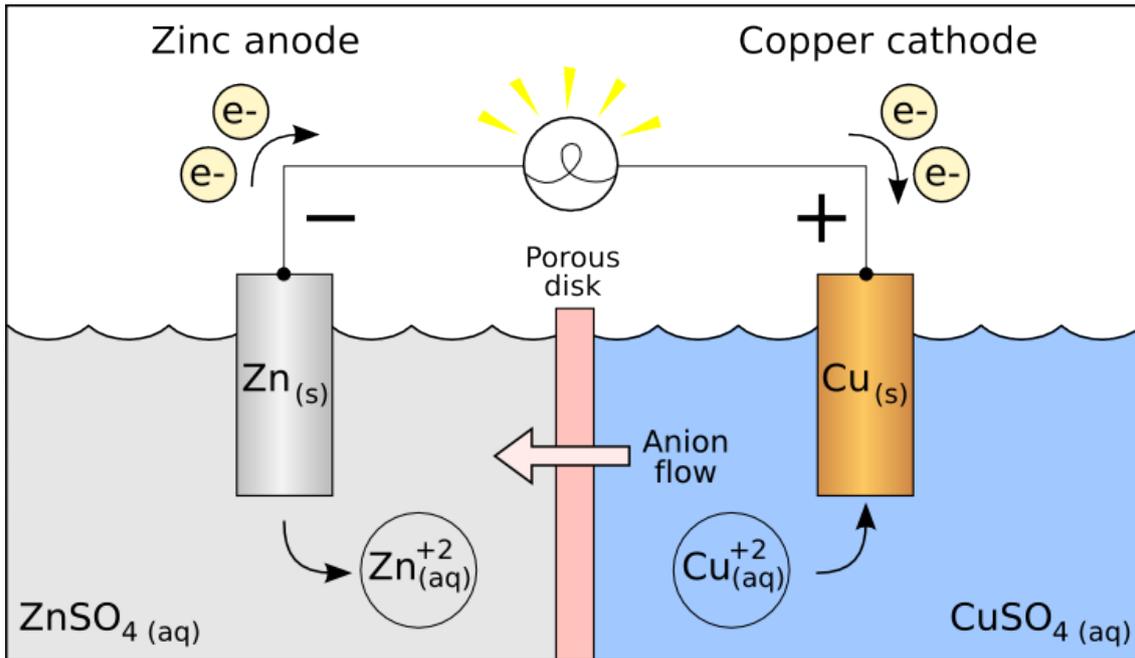


Fig.16: Battery scheme.

La potenza generata da una batteria è data dal prodotto di tensione e corrente, dove la tensione dipende dalla chimica degli elementi adottati.

Una delle principali caratteristiche delle batterie è data dalle alte energie e basse potenze, che comporta tempi di carica e scarica elevati.

I condensatori possono essere di vario tipo, partendo dai più semplici formati da due piastre, dette armature, costituite da materiale conduttore e separate da un dielettrico fino ad arrivare a condensatori formati da due piastre di materiale conduttore separate da un fluido elettrolita e da una membrana. A differenza delle batterie non prevedono modifiche chimiche alla struttura, ma solamente cambiamenti dal punto di vista fisico.

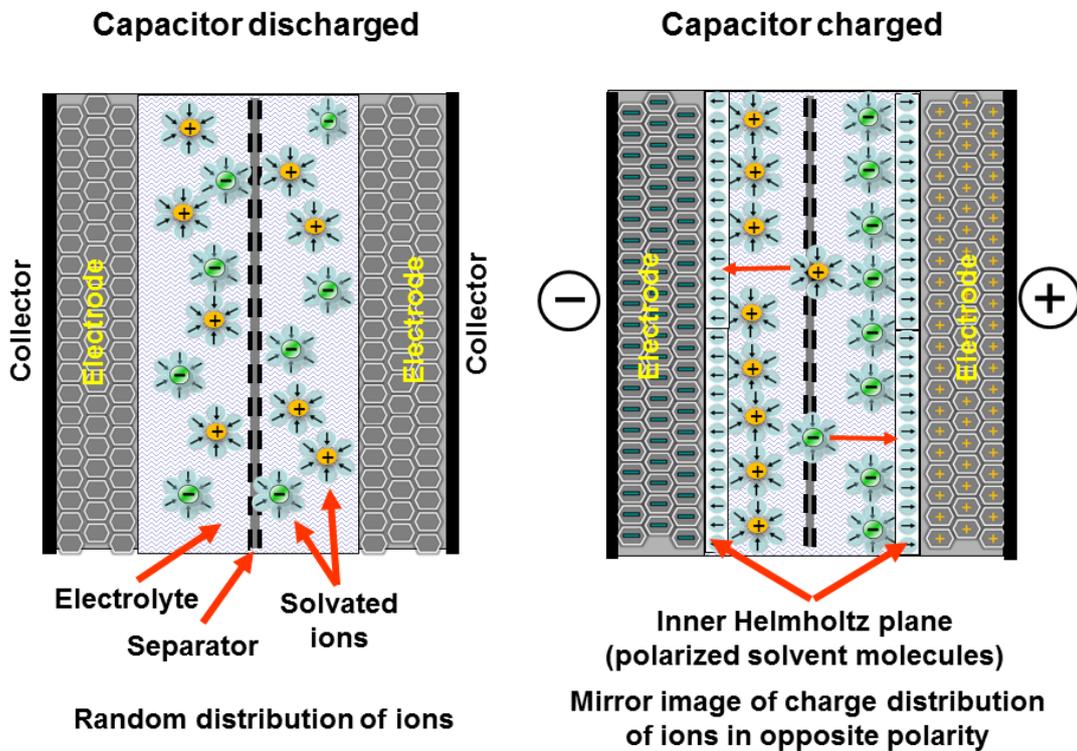


Fig.17: Double-layer capacitor scheme.

Nel caso dei condensatori double-layer le capacità dei condensatori possono arrivare oltre i 1000 F, dove la capacità è proporzionale al rapporto tra superficie (valori elevati) e spessore del dielettrico (valori bassi perché a livello molecolare). La costante di proporzionalità ϵ viene definita permittività elettrica assoluta.

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

$$C = \text{Superficie} \cdot \frac{\epsilon}{\text{spessore dielettrico}}$$

Il vantaggio è quindi offerto dalla mancanza di reazioni chimiche, il limite è invece rappresentato dalle tensioni che possono portare l'elettrolita a bollire.

Più nel dettaglio, il funzionamento dei condensatori double-layer prevede la formazione di un primo layer a contatto con le pareti dei condensatori che è costituito da ioni adsorbiti sull'oggetto mediante interazioni chimiche, mentre il secondo layer è composto da ioni attratti per azione della forza di Coulomb. È proprio la presenza del double-layer a garantire le alte capacità del condensatore, grazie al minuscolo spessore (a livello molecolare) del dielettrico.

I condensatori possono essere di varie tipologie:

- Elettrostatici con double-layer (non Faradaic, ovvero che non sfruttano reazioni redox, ma bensì processi chimici per le particelle cariche distribuite sulla superficie).
- Elettrochimici pseudocapacitori (Faradaic, che sfruttano reazioni redox).
- Ibridi.

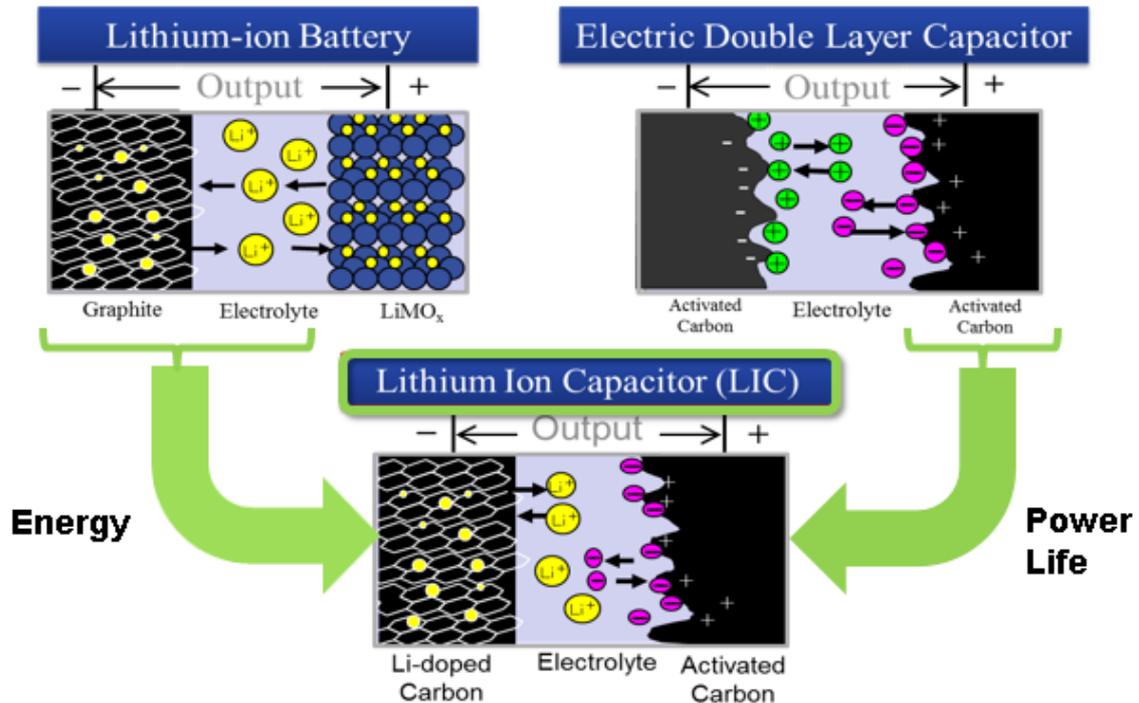


Fig.18: Pseudocapacitor scheme.

I materiali che costituiscono gli elettrodi sono carboni attivi e alcuni ossidi metallici, materiali porosi che garantiscono elevate densità di superficie. Tali elettrodi sono collegati alle armature che accumulano le cariche.

Gli elettrodi sono separati dalla membrana conduttrice di ioni, che si occupa anche di contenere e immobilizzare il liquido elettrolita. Quest'ultimo può essere una soluzione acida acquosa o un liquido organico che riempie gli elettrodi porosi.

I vantaggi dei condensatori sono rappresentati dai veloci processi di carica e scarica. Gli svantaggi sono rappresentati dalla capacità energetica molto più bassa rispetto a quella di una batteria e dalla bassa tensione (circa 3 V): infatti, se questa salisse, le molecole verrebbero attratte alle pareti andando a vincere le resistenze ed eliminando il double-layer.

Il condensatore è, inoltre, molto più leggero di una batteria di pari potenza e presenta resistenze interne molto ridotte, il che permette, a fronte di elevate correnti, di mantenere bassa la potenza dissipata.

Dal punto di vista fisico, è importante ricordare che il condensatore è pseudo-simmetrico, garantisce quindi circa la stessa velocità di carica e di scarica, differentemente dalle batterie che perdono molto in termini di velocità di carica a causa della chimica che le guida.

Per quanto riguarda il parametro di capacità, la capacità equivalente associata ad un parallelo di n condensatori uguali sarà data dalla formula:

$$C_{eq} = n * C$$

Per una serie di n condensatori avremo:

$$C_{eq} = \frac{C}{n}$$

Il principale impiego per cui i condensatori vengono sviluppati è rappresentato dalla spinta aggiuntiva che possono fornire in accelerazione o dal recupero di energia di frenata. Ulteriori potenziali impieghi sono rappresentati dall'introduzione nel micro-hybrid, come accumulatori di basse energie capaci anche di recupero di alte potenze, o dall'utilizzo come sistemi di accumulo secondari negli ibridi, garantendo un downsizing delle batterie elettrochimiche.

2.4 Dimostratore 48 V



Fig.19: Lamborghini Aventador Coupé.

Il dimostratore a 48 V è una Lamborghini Aventador Coupé, nella quale è stato rimosso l'alternatore di serie a 12 V, sostituito da un alternatore a 48 V ubicato appena dietro al motore a combustione interna, che può fornire energia alla batteria o acquisirne per andare, ad esempio, a compensare le inerzie. Tale alternatore si dice essere posizionato in P0.

Il sistema di batterie è costituito da condensatori agli ioni di Litio, che hanno la necessità di rimanere al di sopra di una soglia minima al fine di evitare danneggiamenti. Per i condensatori è stato studiato un layout che prevede di disporli dietro ai sedili.

Il cambio di serie ISR (Independent Shift Rod) a frizione singola, parte della famiglia AMT (Automated Manual Transmission), viene modificato introducendo una macchina elettrica ed un inverter collegato al differenziale posteriore. Tale macchina si dice essere posizionata in P3a, ovvero all'uscita del cambio.

Come tutti i cambi a frizione singola, anche quello Lamborghini presenta la caratteristica di generare un buco di coppia al momento della cambiata, sgradevole nella modalità di guida ad uso urbano. Il comportamento è di breve durata e potrebbe essere colmato da un condensatore capace di erogare l'energia necessaria per coprirlo in breve tempo.

La vita del condensatore è molto più lunga di quella di una batteria, ciò risulta utile dal momento che il numero di cicli di carica e scarica che deve eseguire è molto elevato.

La soluzione di ibridizzare la vettura nasce dunque dall'esigenza di colmare una lacuna strettamente legata ad un aspetto di comfort.

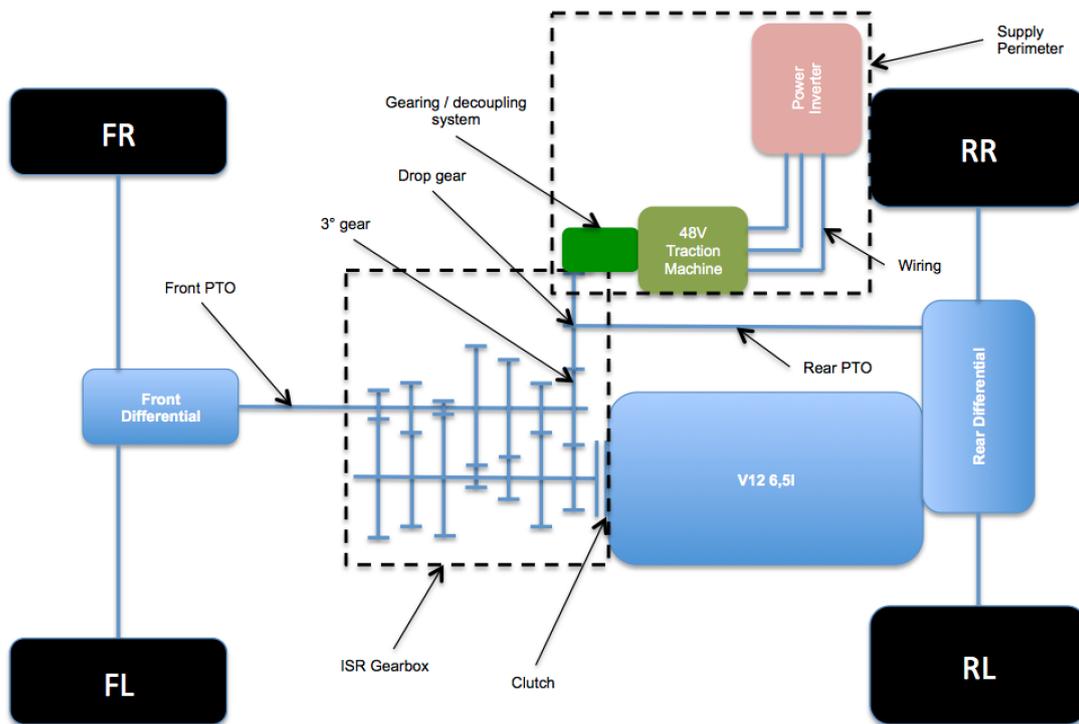


Fig.20: Lamborghini demonstrator structure.

Specifiche tecniche [18]:

- Carrozzeria: Coupé
- Posizione motore: posteriore longitudinale
- Trazione: integrale
- Ingombri (lungh. x largh. x alt. in mm): 4780 x 2040 x 1136
- Diametro minimo sterzata: 12.5 m
- Interasse: 2700 mm
- Posti: 2
- Serbatoio: 90 L
- Motore: V12
- Cilindrata: 6498 cm³
- Potenza: 700 CV (515 kW) a 8250 rpm
- Coppia: 690 Nm a 5500 rpm
- Frizione: a secco

- Cambio: sequenziale ISR a 7 rapporti
- Corpo vettura: monoscocca in fibra di carbonio
- Velocità: 350 km/h

3 **Analisi Software**

La prima fase dell'attività ha previsto l'analisi di alcuni software di modellazione, con l'obiettivo di comprenderne il funzionamento, individuando vantaggi e svantaggi dei singoli ed eseguendo un confronto.

È necessario stabilire se tra i modelli forniti ne esista uno adatto, nella sua totalità o almeno in parte, alle applicazioni che ci si propone di realizzare in futuro, o se altrimenti si renda necessario modellare un nuovo codice, che potrà comunque fare riferimento ai modelli forniti.

I software forniti sono:

- ALPHA.
- QSS TB.
- ADVISOR.
- CO2MPAS.

Sarà necessario stabilire se il codice sia totalmente accessibile o sia protetto in alcune sue parti; in questa prima fase non è richiesto che il modello presenti un'interfaccia grafica accurata, l'obiettivo principale è che possa essere utilizzato da un "esperto" e che sia liberamente modificabile.

3.1 ALPHA

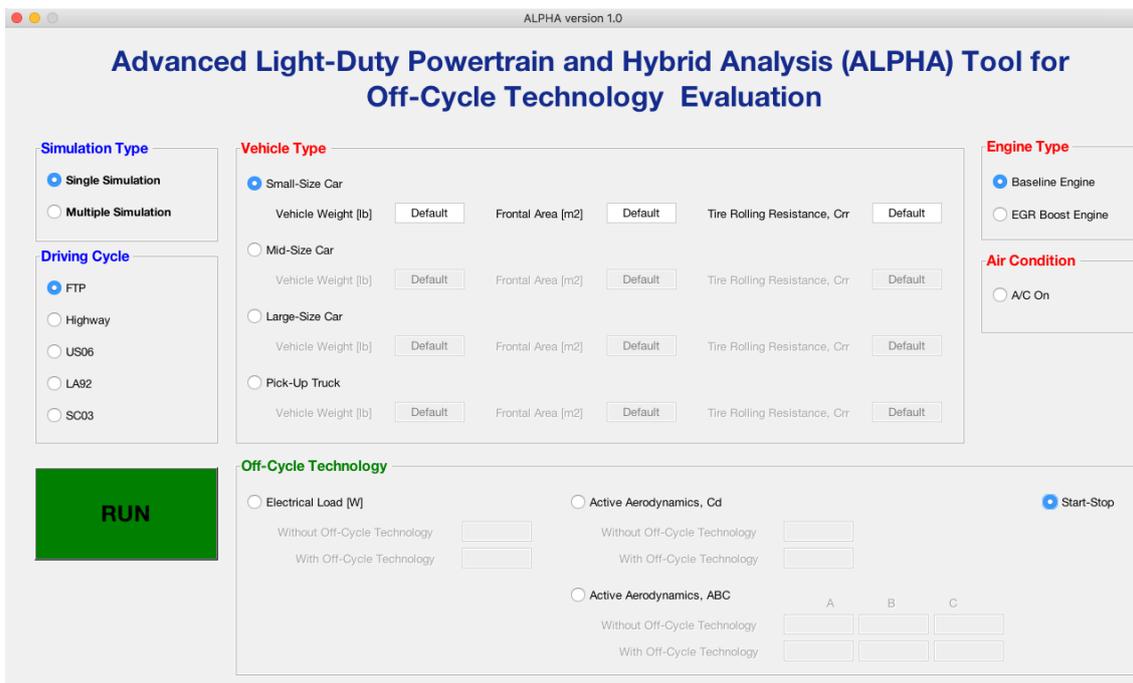


Fig.21: ALPHA Guest User Interface. [19]

È un software predittivo prodotto dalla Environmental Protection Agency che simula l'intero veicolo, sviluppato per MATLAB/Simulink. È stato progettato per stimare le emissioni di gas serra e fornisce la possibilità di simulare una grande varietà di veicoli definendone gli input e la struttura, anche mediante una GUI intuitiva.

Alcuni parametri sono limitati per garantire solo valutazioni della off-cycle technology, in particolare verrà svolto il confronto tra una simulazione con la tecnologia attiva, ed una senza, con la possibilità di attivare in entrambi i casi la funzione dell'aria condizionata.

Le tecnologie simulabili sono:

- Electrical load.
- Active Aerodynamics.
- Start-Stop.

È un software distribuito gratuitamente, è possibile scaricare l'ultima versione disponibile dal sito EPA.

Il modello presenta 6 sottoinsiemi:

- Ambient, che permette di definire le grandezze dell'ambiente di lavoro,

- Driver, che simula il comportamento di un pilota che desidera seguire un particolare profilo di velocità,
- Vehicle, che rappresenta il veicolo,
- Electric, che simula le componenti elettriche presenti nel veicolo,
- Transmission, che simula il cambio,
- Engine, che simula il comportamento del motore e la generazione di coppia.

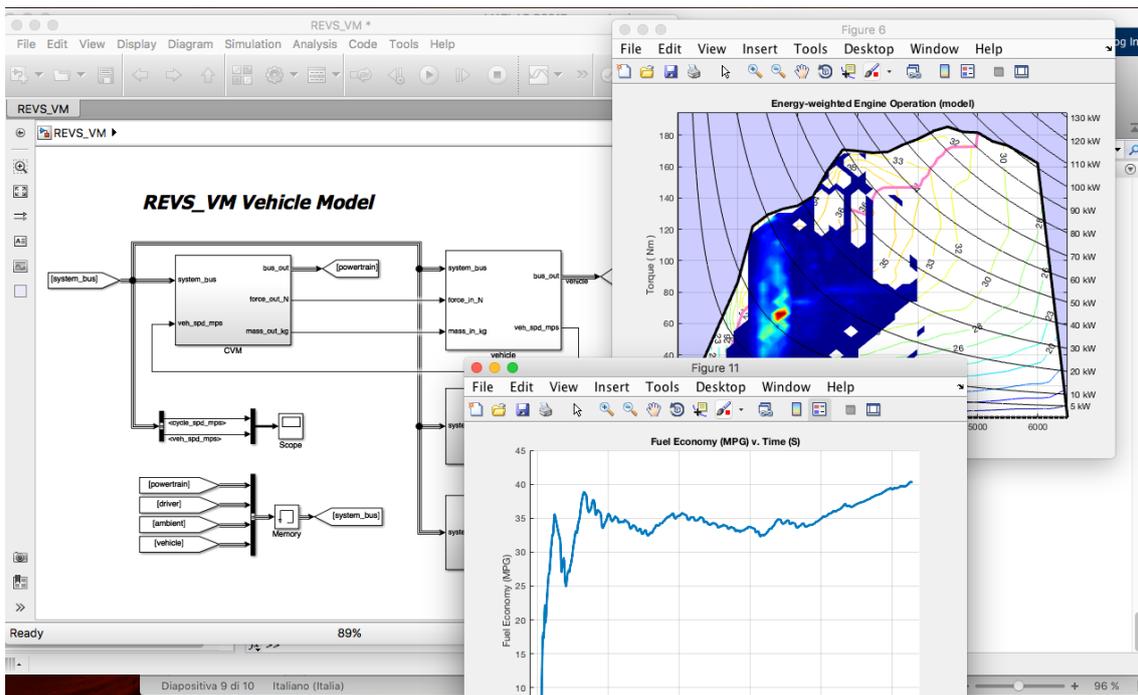


Fig.22: ALPHA v 2.2 results.

3.2 QSS TB

Il software QSS TB [20] è stato sviluppato dall'ETH di Zurigo, permette di progettare velocemente un sistema di powertrain, di calcolare il consumo di carburante e garantisce la possibilità di introdurre componenti di propria creazione.

È stato sviluppato per MATLAB/Simulink con un approccio quasi-statico e non può catturare fenomeni dinamici, inoltre prevede l'inversione del rapporto causa-effetto ponendo come punto di partenza le velocità con conseguente determinazione delle accelerazioni e forze.

L'inserimento dei dati avviene mediante le maschere di Simulink, pertanto la user interface è facilmente accessibile anche per utenti meno esperti. La libreria di elementi del QSS è costituita da:

- Driving cycle, ovvero cicli di guida,
- Controller, ovvero strategie di controllo,
- Vehicle, che rappresenta il veicolo,
- Gear system, che rappresenta il cambio,
- Energy converter, ovvero i motori o generatori,
- Energy buffer, ovvero sorgenti di energia elettriche,
- Energy source, ovvero il serbatoio.

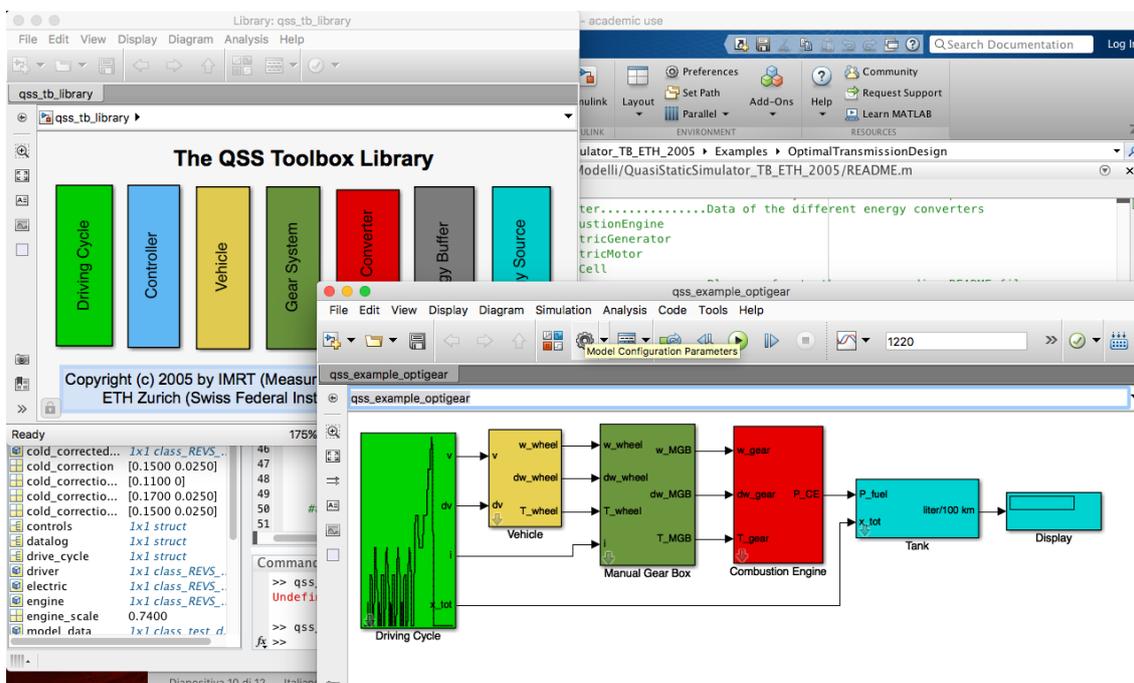


Fig.23: The QSS Toolbox library.

3.3 ADVISOR

ADVISOR [21] è stato prodotto dalla National Renewable Energy Laboratory, permette una rapida analisi della performance e dei consumi dei veicoli convenzionali, elettrici ed ibridi. È stato sviluppato per MATLAB/Simulink.

I principali impieghi sono rappresentati da:

- Stima dei consumi di veicoli non ancora costruiti.
- Apprendimento delle modalità di impiego o perdita di energia del veicolo attraverso le trasmissioni.
- Paragone tra le emissioni prodotte in un certo numero di cicli.
- Elaborazione di strategie di controllo dell'energia per il convertitore di energia in un veicolo ibrido.
- Ottimizzazione dei rapporti di cambio nella trasmissione per minimizzare il consumo di combustibile o massimizzare la performance.

Il software è quasi-statico, perciò non cattura fenomeni dinamici. La GUI è abbastanza intuitiva e permette di svolgere numerose modifiche al veicolo che si desidera simulare.

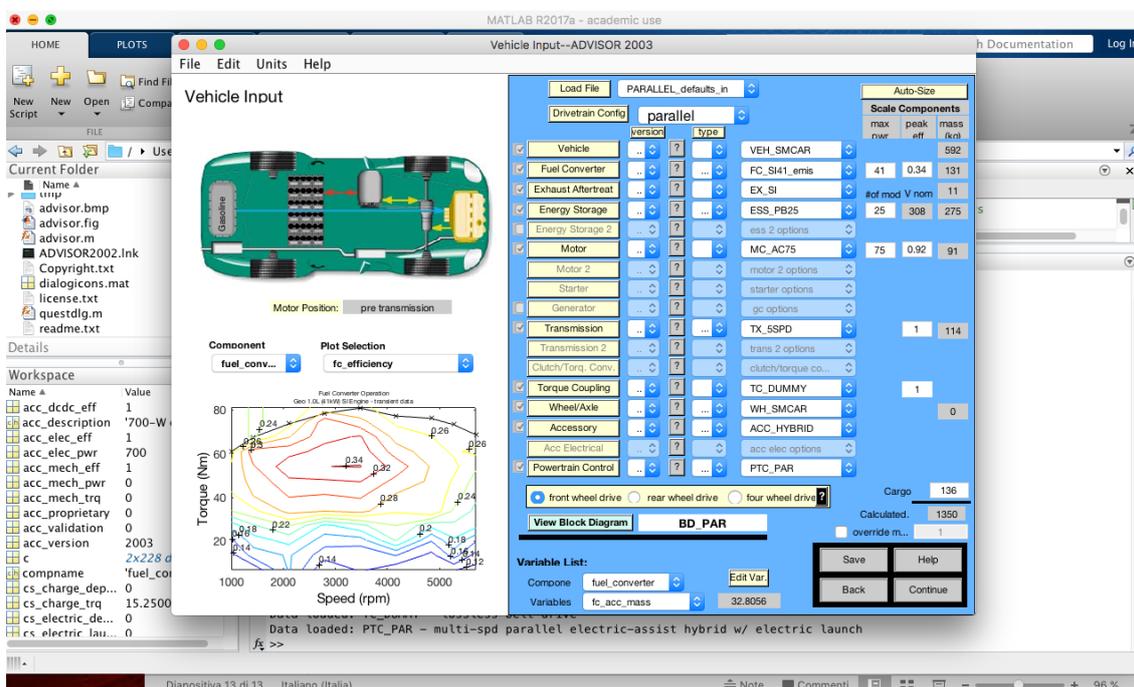


Fig.24: ADVISOR Menu.

3.4 CO₂MPAS

Il software [22], prodotto dal Joint Research Centre of the European Commission, è stato sviluppato per Python, a differenza dei precedenti, e permette di simulare il comportamento di un veicolo, in particolare stimando le emissioni di CO₂. Garantisce anche la possibilità di svolgere una simulazione “Type-Approval”, ovvero di omologazione secondo un ciclo NEDC.

Il software è open source e usa file Excel per dare gli input e gli output della simulazione, l’output è costituito da due file: uno riassuntivo contenente le emissioni ed eventuali segnalazioni di successo o malfunzionamento ed un file contenente gli input ed i risultati ottenuti dalla simulazione, oltre che i sottomodelli impiegati.

Sul sito di riferimento per il download vengono messe a disposizione alcune simulazioni demo che permettono di comprendere come funziona il software stesso, oltre ad un manuale online che dispone anche di un glossario.

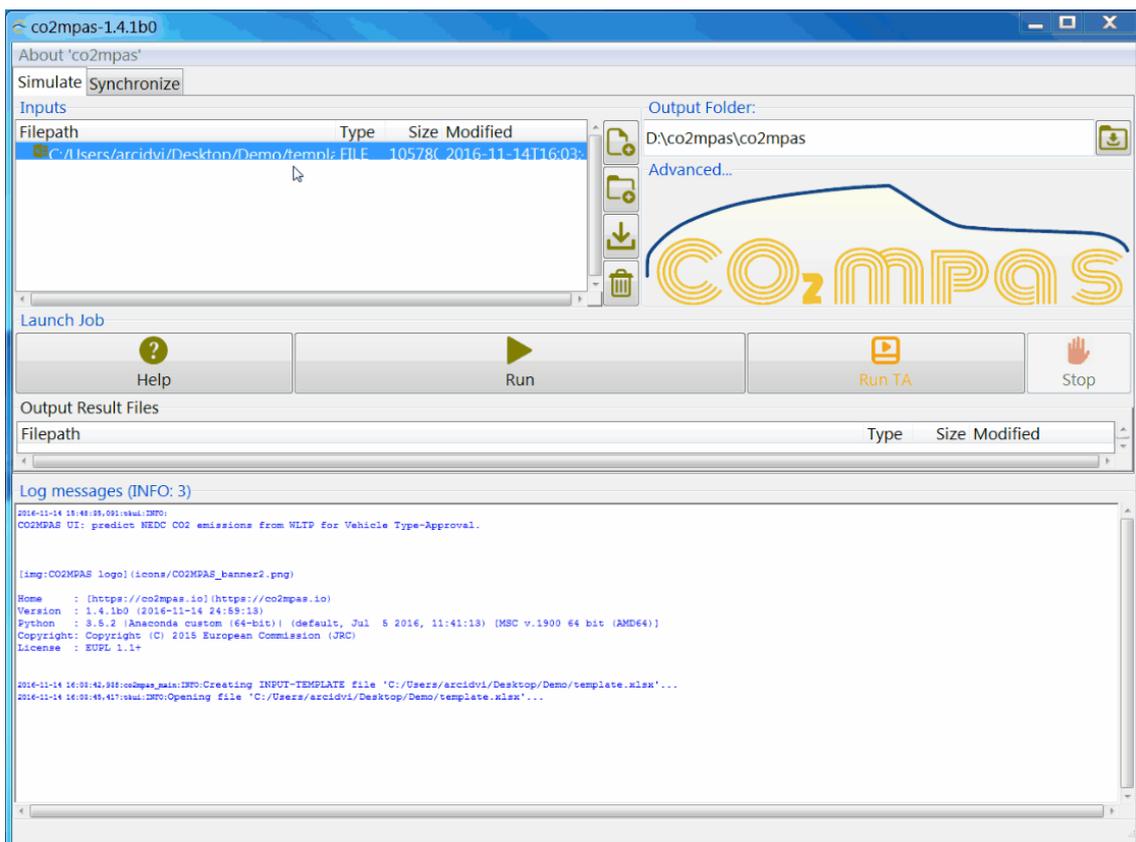


Fig.25: CO₂MPAS GUI.

3.5 Software Lamborghini

Successivamente l'attività si è concentrata sull'analisi del software fornito da Automobili Lamborghini S.p.A., tale software è stato realizzato in Lamborghini nel corso di una attività di tesi (*"Longitudinal Vehicle's dynamics, energy consumption and performance modeling of sports car"*, Antoine Walsdorff, [23]), per cui è interamente disponibile. È stato sviluppato per MATLAB/Simulink.

Il software propone uno strumento di simulazione capace di produrre risultati precisi, per veicoli non esistenti in fase di concept o pre-concept, con particolare attenzione al consumo di combustibile.

Per comprenderne il funzionamento si può fare riferimento al manuale ed alla tesi stessa.

Il software si presenta come "speed-driven", la velocità target che arriva dai cicli di guida viene confrontata con la velocità attuale e l'errore che viene generato viene inviato ad un PI Controller. Questo permette di ottenere un segnale di coppia col quale si accede alle mappe dei consumi.

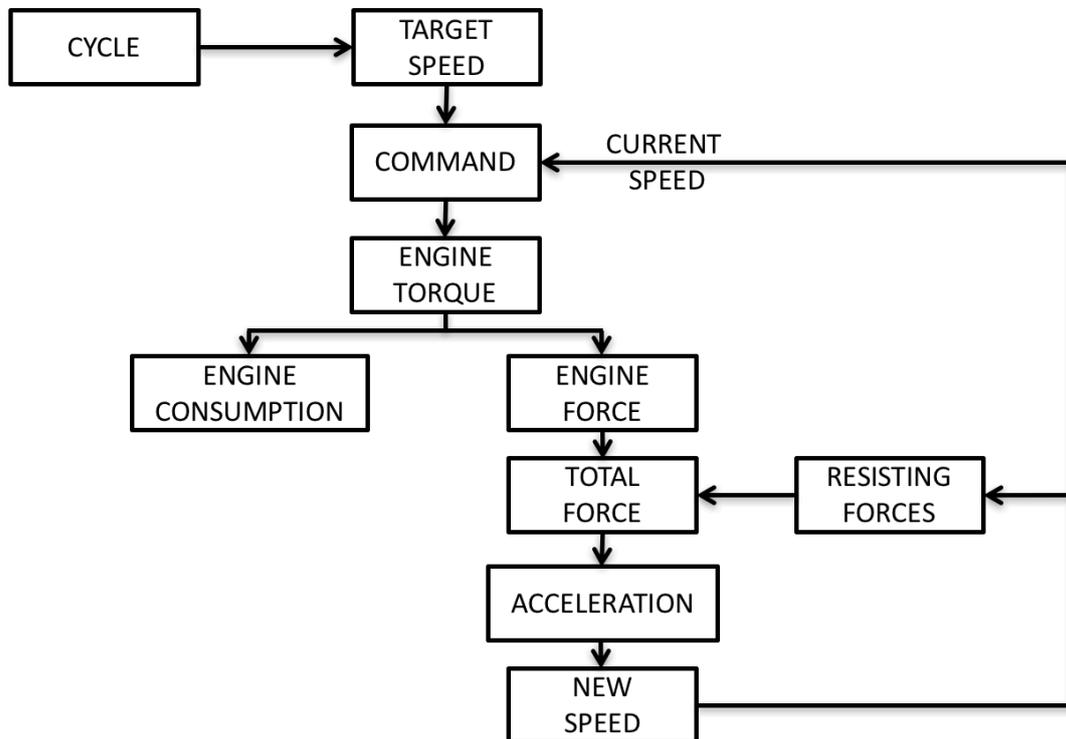


Fig.26: Forward looking scheme.

I sottomodelli sono:

- Inputs, che permette di scegliere tra i vari cicli di guida (NEDC, FTP-75, WLTP o acceleration test),
- PI Controller, che genera il comando in coppia,
- Vehicle, che simula la vettura,
- Performance, che permette di ottenere i tempi dell'acceleration test,
- Consumption, che valuta i consumi.

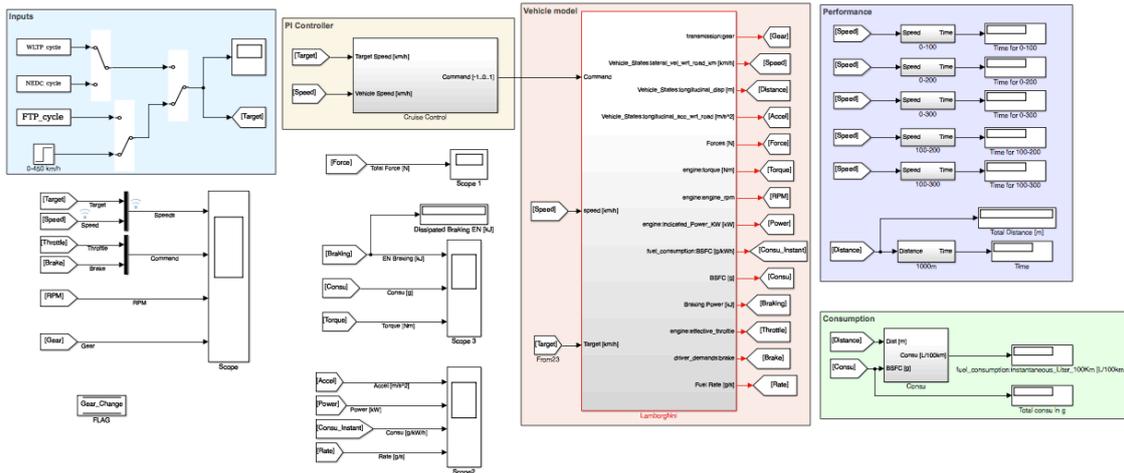


Fig.27: Lamborghini model.

Il modello è stato realizzato con l'adozione di una serie di semplificazioni (quale l'adozione di mappe motore) o ipotesi (quali l'assenza di scivolamento degli pneumatici) che garantiscono una buona velocità di simulazione e, allo stesso tempo, non alterano l'affidabilità dei risultati.

Per il software Lamborghini "Advanced" si mettono in luce alcune delle ipotesi adottate, quali:

- Powertrain semplificato, il motore è una mappa di coppia,
- Mappe per consumi e BSFC,
- Modello pneumatici semplificato,
- Frenata rappresentata da un'unica forza,
- Dipendenza dalla temperatura per l'olio.

A fronte di alcune di queste ipotesi il modello non riesce a restituire risultati particolarmente accurati, conseguentemente si può pensare di andarne a modificare alcuni aspetti per migliorare la precisione dei risultati.

Si può ad esempio introdurre la relazione di dipendenza del cambio dalla temperatura, modellare le perdite derivanti dagli accessori, simulare lo

slittamento delle ruote, introdurre componenti elettrici o passare anche alla modellazione della dinamica trasversale, fino a generare un modello che possa simulare qualsiasi tipo di percorso.

3.5.1 Analisi dei Risultati

Al fine di verificare l'attendibilità del modello, è stata svolta una serie di simulazioni con diversi cicli e diverse ipotesi di funzionamento. Il confronto dei risultati ottenuti viene realizzato con i dati reali, che possono essere visualizzati online su siti specializzati oppure possono essere forniti da Lamborghini.

Le successive simulazioni fanno riferimento ad una Lamborghini Murcielago.

Confrontando i risultati ottenuti, si può notare una leggera differenza con ciò che è possibile leggere nella tesi *"Longitudinal Vehicle's dynamics, energy consumption and performance modeling of sports car"* [23], a parità di condizioni di funzionamento. La diversità nei risultati può essere spiegata attraverso differenze nella lettura dei grafici o diverse scelte di approssimazione e non sale mai sopra il 5%, il che la rende trascurabile.

Il calcolo del consumo di combustibile viene ottenuto mediante la seguente formula:

$$consumo\left(\frac{L}{100\ km}\right) = \frac{BSFC(g)}{distanza(km)} \cdot \frac{1}{10 \cdot densità\left(\frac{kg}{L}\right)}$$

La riga "ΔCalcolo" si riferisce alla differenza tra il risultato calcolato dalle mie simulazioni e quello reale [24], mentre la riga "ΔAdvanced" indica la differenza tra il risultato ottenuto dalle simulazioni effettuate in tesi [23] ed il valore reale [24].

NEDC Test (L/100km)	Urban	Extra-Urban	Combined
ΔCalcolo	1,0	0,6	0,0
ΔAdvanced	0,6	0,9	0,4
Error calcolo vs Advanced (%)	1,3	2,1	1,9
Error Real vs calcolo (%)	3,1	3,9	0,0
Error Real vs Advanced (%)	1,9	6,1	1,9

Table 3: Results analysis NEDC.

FTP-75 Test (L/100km)	Cold Start	Urban Driving	Hot Start	Combined
ΔCalcolo	2,7	3,3	2,0	2,3
ΔAdvanced	2,2	2,8	1,8	2,3
Error calcolo vs Advanced (%)	2,3	2,2	1,2	0,0
Error Real vs calcolo (%)	10,9	11,9	9,5	9,3
Error Real vs Advanced (%)	8,9	9,9	8,4	9,3

Table 4: Results analysis FTP-75.

Come si può notare, i risultati del test NEDC sono vicini alla realtà. I dati reali sono stati rintracciati online [24], sono quindi valori pubblicati dalla stampa specializzata.

I risultati del test FTP-75 sono associati ad errori maggiori, in questo caso i dati reali sono stati forniti da Lamborghini.

Basandoci su queste assunzioni si può stimare l'errore tra modello e realtà come incluso tra 4-10%.

WLTP Test (L/100km)	Low	Medium	High	Extra-High
Calcolo	35,8	20	17,3	16,5
Advanced	35,6	20,5	17,8	16,8
Error calcolo vs Advanced (%)	0,6	2,5	2,9	1,8

Table 5: Results analysis WLTP.

Il test WLTP non è mai stato affrontato in quanto non ancora omologativo, quindi non esistono dati reali ad esso associati.

Acceleration Test (s)	0-100 km/h	0-200 km/h	0-300 km/h	100-200 km/h	100-300 km/h
Calcolo	3,681	10,3	30,32	6,615	26,64
Advanced	3,926	11,03	32,87	7,105	28,95
Reality	3,2	10,2	31,5	7	28,3
Error calcolo vs Advanced (%)	6,7	7,1	8,4	7,4	8,7
Error Real vs calcolo (%)	15,0	1,0	3,7	5,5	5,9
Error Real vs Advanced (%)	22,7	8,1	4,3	1,5	2,3

Table 6: Results analysis acceleration test.

I risultati della fase tra 0-20 km/h non possono essere considerati attendibili a causa della mancanza del modello di slittamento delle ruote, inoltre è forte la dipendenza dalla temperatura dell'olio, che può condizionare in maniera significativa i risultati. [25]

Sono quindi state eseguite una serie di simulazioni volte a verificare l'affidabilità del modello, l'obiettivo è comprendere se le modifiche effettuate ritrovano un corrispettivo cambiamento nei risultati ottenuti.

Nelle simulazioni svolte sono stati modificati:

- Profilo di temperatura, dove un aumento della temperatura dell'olio sarebbe associato ad una riduzione della viscosità e dunque degli attriti e delle FMEP, con conseguente aumento della coppia e riduzione dei consumi.
- RPM al minimo, dove una minore velocità di partenza del motore implica un tempo maggiore per arrivare ad alti giri, con conseguente allungamento dei tempi necessari per raggiungere le alte velocità in un acceleration test.
- Tempo di cambio marcia, dove una riduzione dei tempi di cambiata fa sì che si fornisca coppia in maniera più continuativa, con conseguente riduzione dei tempi in un acceleration test.
- Efficienze, dove le minori efficienze e i maggiori attriti porteranno a minori coppie e maggiori consumi.
- Parametri del PI Controller, che portano a forti differenze nella modalità con cui viene seguito il profilo di velocità dato dal ciclo di input.

- Forza aerodinamica, dove una maggiore forza aerodinamica provoca tempi maggiori nell'acceleration test e maggiori consumi, infatti le forze resistenti sono maggiori e, conseguentemente, le accelerazioni minori.
- Split di coppia tra asse anteriore e posteriore, dal momento che è assente la dinamica trasversale, non avremo problemi di sovrasterzo o sottosterzo e mancherà anche lo slittamento delle ruote per via delle ipotesi fatte, così che un eventuale cambiamento nella suddivisione della coppia non provoca cambiamenti significativi nei risultati.

Tutte queste simulazioni hanno seguito le attese, dimostrando che il modello è coerente con le modifiche agli input effettuate.

4 Modalità Scambio Dati

4.1 Windchill

Lo scambio dati rappresenta una delle principali necessità all'interno di un'azienda, vari utenti necessiteranno delle stesse informazioni che andranno dunque condivise secondo modalità uniformi e concordate.

La base di condivisione dei dati è rappresentata da Windchill, un approccio strategico alla gestione di informazioni, dei processi e delle risorse a supporto del ciclo di vita dei prodotti che ha come obiettivo quello di ottimizzare lo sviluppo, il lancio, la modifica ed il ritiro dei prodotti stessi dal mercato. Questo permette di scambiare informazioni tra membri de team di lavoro ossia tra persone di differenti reparti aziendali oltre che da fornitori e partner esterni.

Una volta effettuato l'accesso a Windchill tramite autenticazione forte (PKI o token), sarà possibile ricercare i dati di interesse o navigare tra i propri progetti.

Il progetto rappresenta un'area di condivisione all'interno della quale verranno caricati i dati di interesse agli utenti del progetto stesso. L'accesso al progetto andrà richiesto al Project Manager, responsabile a cui si dovrà fare riferimento.

Il progetto sarà diviso in due sottocartelle: Presentation e Datasheet.

4.2 File di Interscambio

All'interno della cartella Datasheet verranno introdotti i file di interscambio, principale elemento di scambio dati.

I file di interscambio sono costituiti da file excel .xls in cui vengono inseriti i dati di interesse. Esistono una serie di template a cui fare riferimento che differiscono per le differenti tipologie di dati che possono essere trattate (aerodinamica, motore, trasmissione...).

La nomenclatura di input ed output è classificata e fa riferimento alla nomenclatura adottata nel software ViGrade CRT, che è un ambiente di modellazione e simulazione veicolo in real-time.

L'adozione di una nomenclatura unificata garantisce la possibilità di considerare allo stesso modo i dati provenienti da simulazioni (ad esempio realizzate su MATLAB/Simulink), dal simulatore o da prove su pista. I dati introdotti presenteranno lo stesso nome e, una volta inseriti nel database, presenteranno le stesse caratteristiche e saranno facilmente confrontabili.

4.3 GIT HUB

Mentre Windchill rappresenta lo strumento di scambio dati, GIT HUB costituisce lo strumento corrispondente nello scambio di modelli.

Il software viene utilizzato all'interno dei vari gruppi di Lamborghini dal momento che garantisce a più utenti la possibilità di lavorare contemporaneamente sullo stesso progetto.

Il generico file sarà infatti contemporaneamente disponibile per il comune utilizzo da parte degli utenti e per la modifica, senza che una delle attività impedisca l'altra. A modifiche terminate il file originale verrà aggiornato andando ad uniformare le versioni.

5 Componenti Elettriche

5.1 Lithium Ion Capacitor

Ricordiamo il posizionamento del condensatore agli ioni di Litio utilizzato sulla vettura Lamborghini, capace di erogare alte potenze.

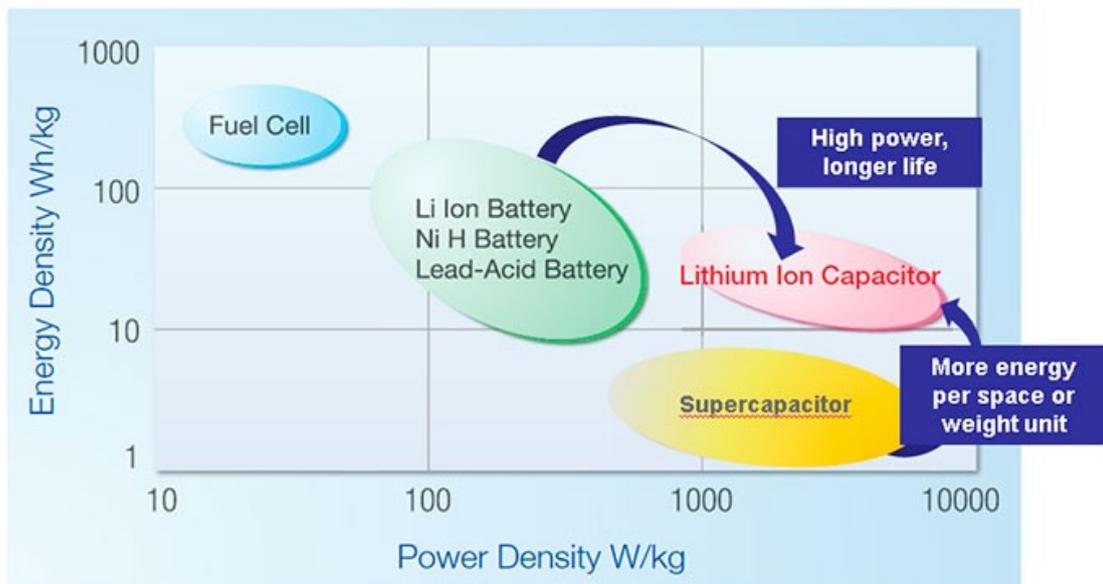


Fig.28: LiC positioning.[26]

Il LiC ULTIMO 3300 F utilizzato è, in particolare, un condensatore agli ioni di Litio composto da un anodo in carbonio simile all'elettrodo negativo delle batterie agli ioni di litio. L'elettrodo positivo consiste di carbonio attivo, come i catodi dei condensatori double-layer.

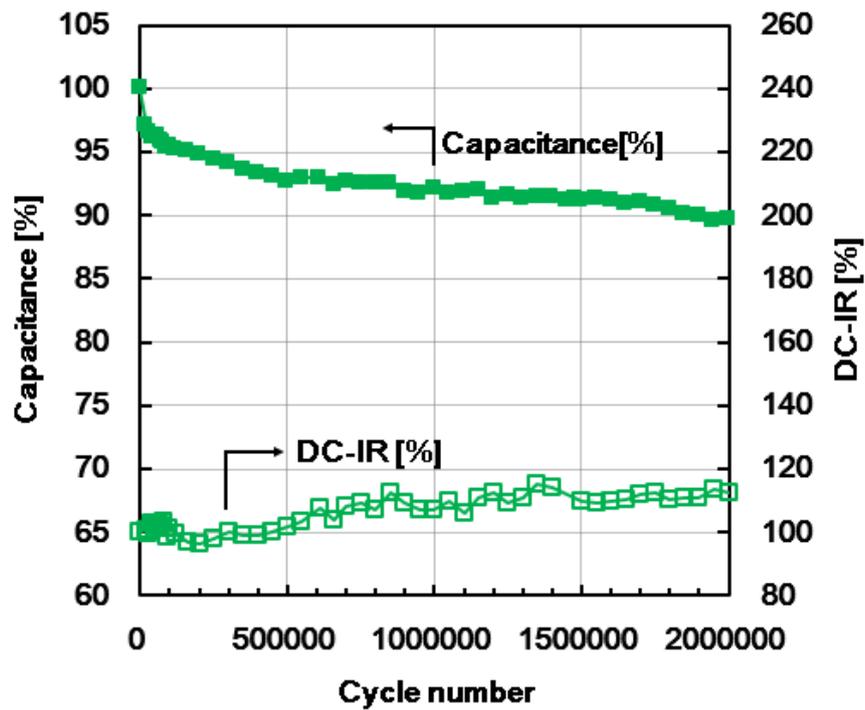


Fig.29: Life cycle performance (1).

Test condition [26]: Charge: CC 200 A to 3.8 V; discharge: CC 200 A to 2.2 V; no rest times between charging and discharging, (ULTIMO 2300F ULR Prismatic), ambient temperature. (CC: constant current)

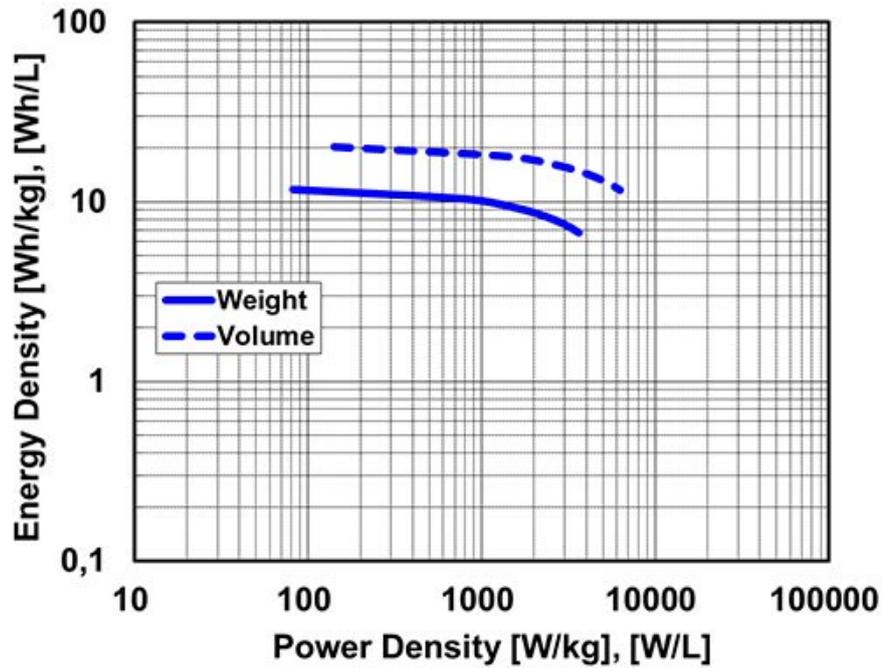


Fig.30: Energy-Power positioning.

Test condition [26]: Charge: CCCV 10 A to 3.8 V; discharge: CC 10~480 A to 2.2 V, ambient temperature (ULTIMO 3300F LR Prismatic). (CCCV: constant current, constant voltage, CC: constant current)

ULTIMO cells can achieve an energy density of 13 Wh/kg.

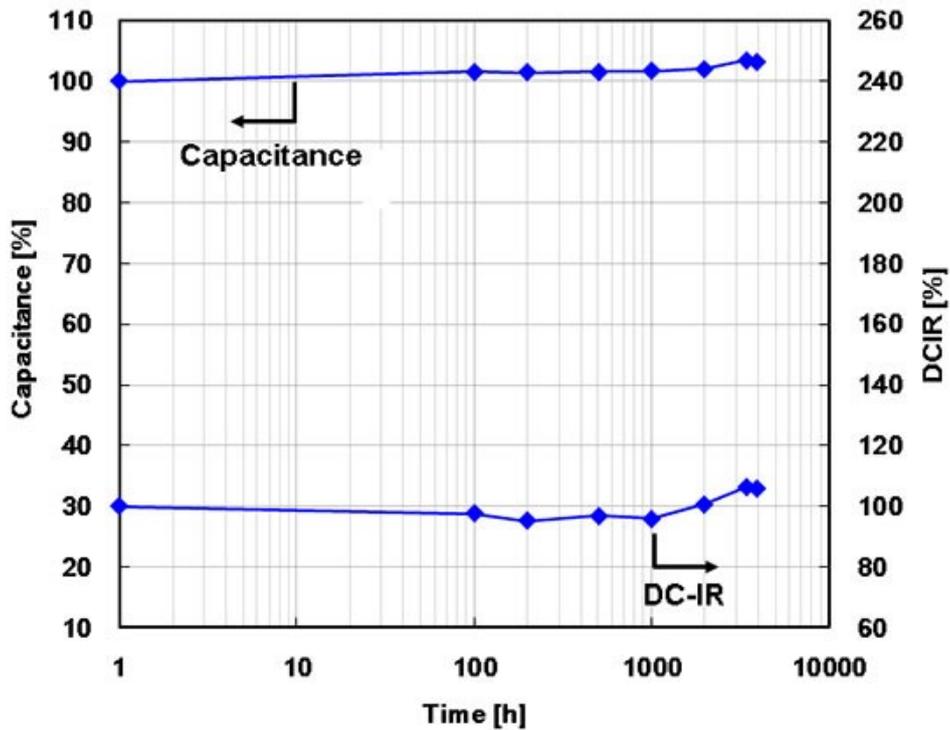


Fig.31: Life cycle performance (2).

Test condition [26]: Constant voltage: 3.8 V in an ambient temperature of 70°C (ULTIMO 2300F ULR Prismatic). After six months of operation at maximum temperature and maximum Voltage, no noticeable deterioration has been observed.

Altri test svolti sono quelli di sicurezza [26]:

Test	Conditions	Results	
		Fire	Rupture
Overcharge	Current: 200A State of Charge: 250% Max. Voltage: 20 V With constraining unit	Not observed	Not observed

Over-discharge	Current: 200A Voltage: 0 V	Not observed	Not observed
External short circuit	Short resistance: 3mΩ Ambient temperature: 55°C	Not observed	Not observed

Table 7: LiC tests.

Di seguito riportiamo le specifiche del LiC ULTIMO 3300 F adottato [26]:

Measurement Items		ULTIMO 2300F ULR Prismatic	ULTIMO 3300F LR Prismatic	Conditions	
Range of Operating Temperatures		-30°C~70°C	-30°C~70°C		
Rated Voltage	Maximum	3.8V	3.8V		
	Minimum	2.2V	2.2V		
Initial Characteristics	Capacitance	2300F	3300F	Constant Current Discharge , 25°C	
	ESR	0.6mΩ	0.7mΩ	1kHz	
	DC-IR	0.7mΩ	1.0mΩ	Constant Current Discharge , 25°C	
	Weight E-density Volume E-density	8Wh/kg 14Wh/L	13Wh/kg 20Wh/L	Constant Current Discharge , 25°C	
Temperature Dependence	-20°C	Capacitance ratio(vs 25C)	85%	Constant Current Discharge , 25°C	
	70°C		100%		
Self Discharge Characteristics		Voltage Reduction	< 5%	< 5%	3 Months,25°C
Cell size			150.0x93.0x15.5mm	150x93.0x15.5mm	Without Terminal
Weight			0.365kg	0.350kg	

Fig.32: LiC specifications.

LiC Technology BEG LiC Module

Ultimo 3300F	14S1P
Min. Spannung	30,8 V
Max. Spannung	53,2 V
Energieinhalt (BOL)	61,6 Wh
DC-IR	16,25 mΩ
Zellgewicht	4,9 kg
Zellvolumen	2,98 l
Gehäusegewicht	~ 3 kg
Cooling	Air Cooling

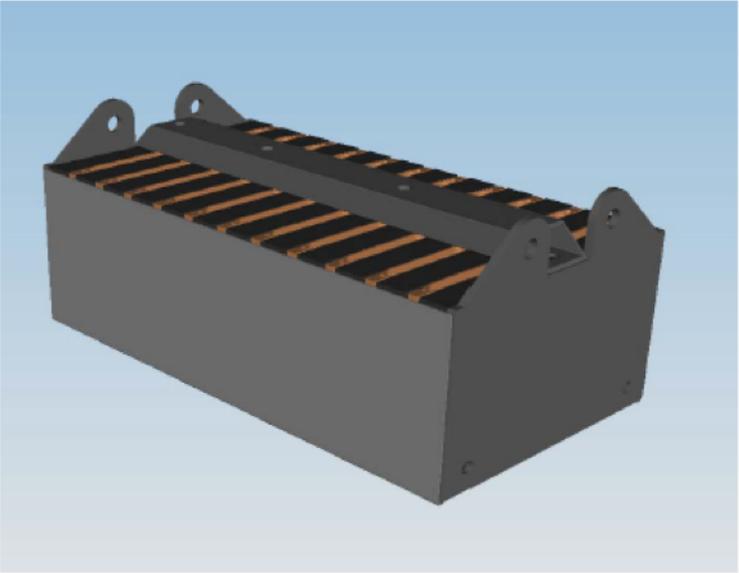


Fig.33: LiC module specifications.

Al LiC può essere associato uno stato di carica determinabile nota l'energia accumulata ed il valore massimo contenibile. [27]

Esistono vari metodi per misurare lo stato di carica di un sistema, ad esempio è possibile fare uso del parametro energetico come della tensione accumulata.

5.1.1 Struttura Modello LiC

L'individuazione di un modello di LiC adatto alle nostre finalità comporta una accurata analisi delle condizioni di lavoro. L'idea è che il LiC si trovi a valle del motore elettrico e sia quindi guidato dai segnali provenienti da quest'ultimo.

Il dato su cui si basa il confronto con lo stato di carica è la tensione, che può essere quindi adottata come grandezza di riferimento in input. I limiti sulla tensione legati alla norma VDA 320 (Verband der Automobilindustrie) sono verificati in input, successivamente bisognerà verificare anche i valori in corrente.

Il modello può essere più o meno semplificato, inserendo ad esempio il parametro di leakage, il cui contributo è però poco significativo nel corso del normale funzionamento.

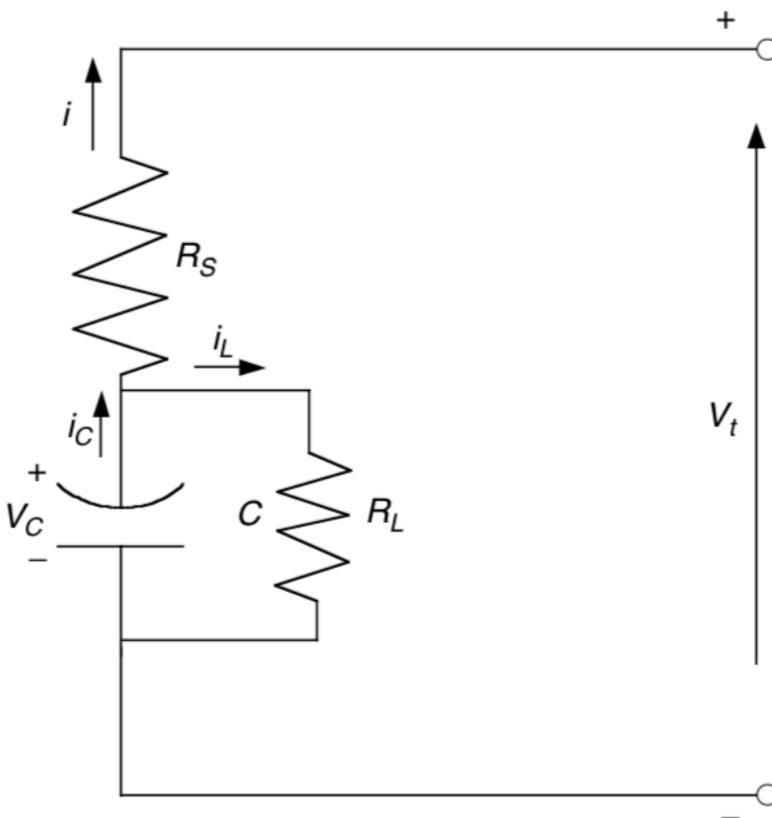


Fig.34: LiC model.

È possibile fare riferimento al modello riportato perché ne riporta le principali caratteristiche.

$$V_t = V_c - i \cdot R_s$$

$$\frac{dV_c}{dt} = -\left(\frac{i + i_l}{C}\right)$$

$$i_l = \frac{V_c}{R_L}$$

$$\frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_c}{C \cdot R_L} - \frac{i}{C}$$

Il modello di LiC è stato validato andando a confrontare i risultati della simulazione con alcuni test ottenuti mediante cicli di emissione FTP-75.

La prova è stata effettuata andando a impostare come input la tensione ai terminali del LiC (proveniente dal controllo di strategia e inverter), a fronte di questa abbiamo confrontato le correnti simulate in uscita ed i valori misurati nel corso del test.

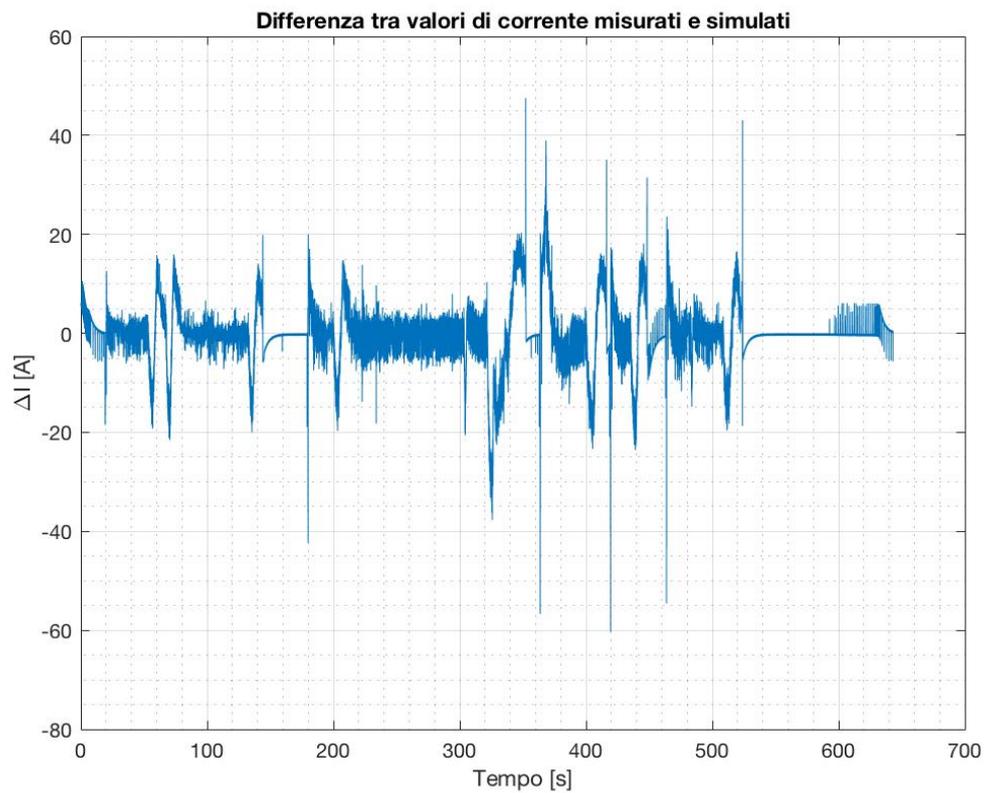


Fig.35: Current differences (1).

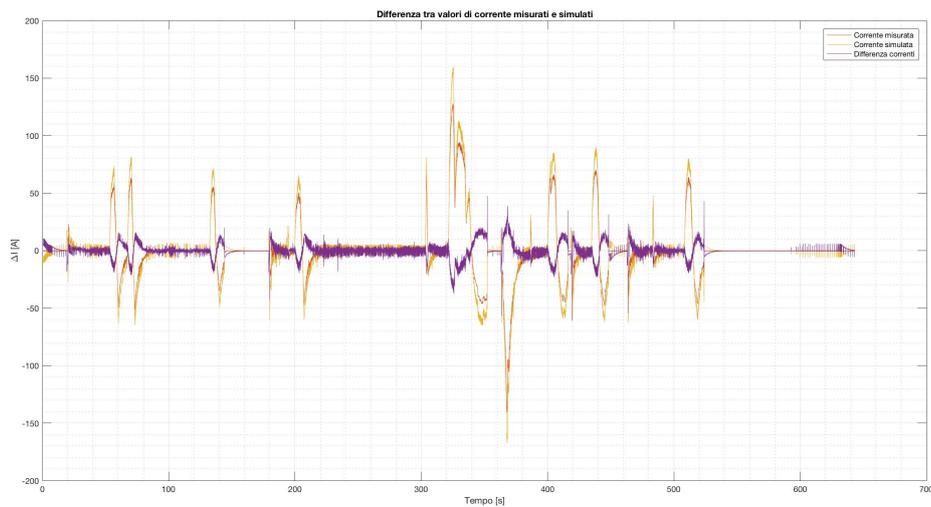


Fig.36: Current differences (2).

I risultati ottenuti mostrano come il modello riesca a simulare correttamente la corrente, registrando qualche difficoltà solo in occasione di rapidi cambiamenti della tensione in ingresso. Per garantire migliori simulazioni si potrebbe proseguire l'attività di analisi del LiC, introducendo la dipendenza dalla resistenza di leakage oltre che la termica del modello.

Le prove sono state svolte su una finestra ridotta dei dati conosciuti, ma se fosse necessario è possibile ampliare l'intervallo di analisi.

5.2 Motore Elettrico e Inverter

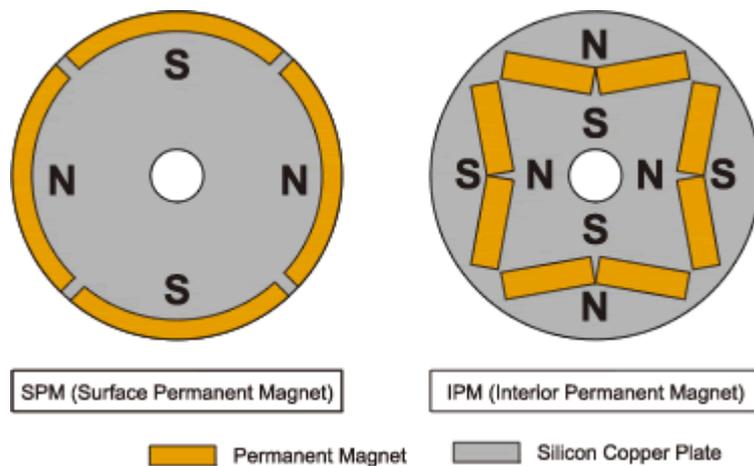


Fig.37: Permanent magnet motor.

Per decenni, i motori a magneti permanenti superficiali (SPM) hanno dominato il mercato. Negli ultimi anni, il mercato dei veicoli ibridi ed il costo crescente dei magneti di terre rare hanno fatto crescere la domanda per i motori a magneti permanenti interni (IPM). I vantaggi sono rappresentati dalla potenza pressoché costante su un vasto campo di velocità e da un design che protegge i magneti. [28]

I motori elettrici sono costituiti da uno statore ed un rotore. Lo statore presenta una serie di avvolgimenti che, percorsi da corrente, portano alla generazione del flusso magnetico. Il flusso dello statore interagisce con il rotore, che ruota per allinearsi con i campi statorici. La forza di allineamento genera una coppia, che, mettendo in rotazione il rotore, muove l'albero e, dunque, il carico collegato.

La forza rotante applicata al rotore può nascere da diverse sorgenti. Nel caso dei motori a magneti permanenti, la sorgente primaria è dovuta all'interazione tra flusso statorico e poli N/S dei magneti. Un motore SPM presenta magneti applicati alla superficie del rotore con adesivo o cinghie o alloggiamenti.

Il rotore di un motore IPM consiste in una sequenza di laminati metallici stampati con alloggiamenti in cui vengono inseriti i magneti, in modo tale che possano resistere anche a forti scosse, vibrazioni ed alle forze in gioco.

I motori IPM producono coppia mediante due diversi meccanismi. Il primo prevede generazione di coppia dall'interazione tra il flusso del campo rotorico ed il campo elettromagnetico dello statore, come nel caso dei motori SPM.

Il secondo meccanismo porta alla generazione di un contributo di forza di riluttanza [29]. Questa componente nasce dalla caratteristica dei materiali magnetici di allinearsi con il campo magnetico in modo da garantire che la riluttanza del circuito magnetico sia la minima possibile. Il rotore subisce una forza che allinea le linee di flusso magnetico con quelle generate dagli avvolgimenti dello statore.

Tali avvolgimenti sono energizzati in modo da generare una sequenza di poli nord-sud alternati, il rotore seguirà quella progressione, generando coppia di riluttanza e provocandone la continua rotazione.

Dato che i motori IPM incrementano la coppia generata attraverso la coppia di riluttanza, i magneti usati possono essere più piccoli. Ciò permette di ridurre i costi dei materiali dei motori. [30]

5.2.1 Struttura Modello

Il motore adottato è un motore IPM (Internal Permanent Magnet) a 4 poli, è in grado di erogare una potenza di picco pari a circa 25 kW e prevede un campo di funzionamento pari a circa 32-52 V.

I dati forniti di efficienza e corrente IDC riguardano non solo il motore ma valutano direttamente il sistema costituito da motore ed inverter. La modellazione prevede infatti di considerare il sistema come un blocco unico.

Una scelta di questo tipo, basata su mappe, favorisce la velocità di calcolo e si riferisce a dati reali determinati attraverso prove sperimentali. Allo stesso tempo impedisce di conoscere nel dettaglio il funzionamento del componente analizzato che si presenta come “black box”.

Analizzando i diagrammi disponibili si noterà che le informazioni sono state valutate a breakpoint equispaziati. Purtroppo, la scelta di rilevare in questo modo i dati di interesse può produrre approssimazioni errate.

Il software MATLAB prevede la possibilità di scegliere la modalità di interpolazione delle tabelle di dati (n-D Lookup Table), con la possibilità di effettuare un trade-off tra complessità di calcolo e accuratezza del risultato: una scelta comune, capace di produrre buoni risultati, è quella di interpolare linearmente.

È possibile, allo stesso tempo, che le grandezze analizzate non siano adeguatamente approssimabili con delle rette, in particolare su alcuni tratti di curva potrebbero nascere errori significativi. Una semplice soluzione per migliorare l'accuratezza dei risultati può essere adottata in fase di acquisizione delle grandezze, infatti è comune la scelta di infittire i breakpoint nelle zone dove l'andamento reale più si discosta dalla linearità. Tale scelta permette di evitare differenze eccessive tra dato reale e dato ricavato da tabella.

Il fornitore EMPower realizza il processo di caratterizzazione del motore stesso, andando a determinare le mappe di rendimento e corrente assorbita in funzione della coppia e dei giri motore oltre che della tensione a cui si sta lavorando.

Gli input sono rappresentati dalla richiesta di coppia elettrica definita dalla strategia, dai giri del motore elettrico e dalla tensione a cui il motore sta lavorando.

Noto il punto di funzionamento si potranno individuare rendimento e corrente assorbita dalle mappe. Il dato di rendimento ci permetterà di conoscere la coppia e la potenza realmente richieste dal motore elettrico stesso.

In particolare, nel funzionamento da motore divido la coppia richiesta per il rendimento e alzo così la richiesta.

Nel funzionamento da generatore moltiplico invece la coppia per il rendimento e abbasso la richiesta.

Una nota deve essere fatta sulle mappe ottenute dai fornitori, i punti di funzionamento analizzati sono quelli appartenenti al primo quadrante, quindi a coppia e velocità di rotazione positive. I punti di funzionamento del secondo quadrante verranno dedotti per simmetria con quella che è una approssimazione comunemente accettata.

Lo scambio dati è avvenuto mediante file excel, che sono stati riportati al formato standard di interscambio. Successivamente avviene l'acquisizione in MATLAB e l'inserimento dei dati in Simulink.

In un'ottica di scambio dei risultati, potremo fare riferimento al manuale ViGrade CRT per definire la nomenclatura delle grandezze di input e output delle componenti elettriche.

Motor

effective throttle

"effective throttle demand of motor [0-1]"

engine_rpm

"motor rotational velocity (rpm)"

Max_Engine_torque

"maximum motor torque at the current rotational velocity (newton-meter)"

Min_Engine_torque

"minimum motor torque at the current rotational velocity (newton-meter)"

Power_KW

"motor power (KW)"

torque

"motor torque (newton-meter)"

Come si può notare non esiste una terminologia specifica, secondo ViGrade CRT il motore elettrico rientra nel campo dei motori addizionali introdotti nel modello.

Va specificato che ci si riferisce al motore elettrico con la parola "engine", nonostante il termine in questione indichi macchine che producono energia a partire da combustibile liquido o gassoso per produrre movimento e dunque sia più adatto ai motori a combustione interna. [31]

La nomenclatura è dunque scorretta, ma dettata dalla volontà di adeguarsi ad un linguaggio standard.

5.3 Sistema Integrato

Il sistema integrato di motore elettrico, inverter e LiC che verrà inserito nel modello si presenta dunque in questo modo:

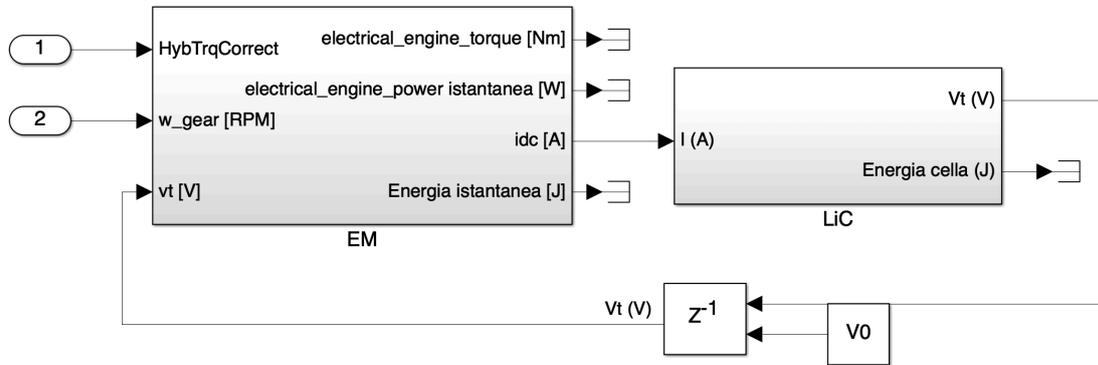


Fig.38: Integrated system.

Il sottoinsieme del motore elettrico è dato da:

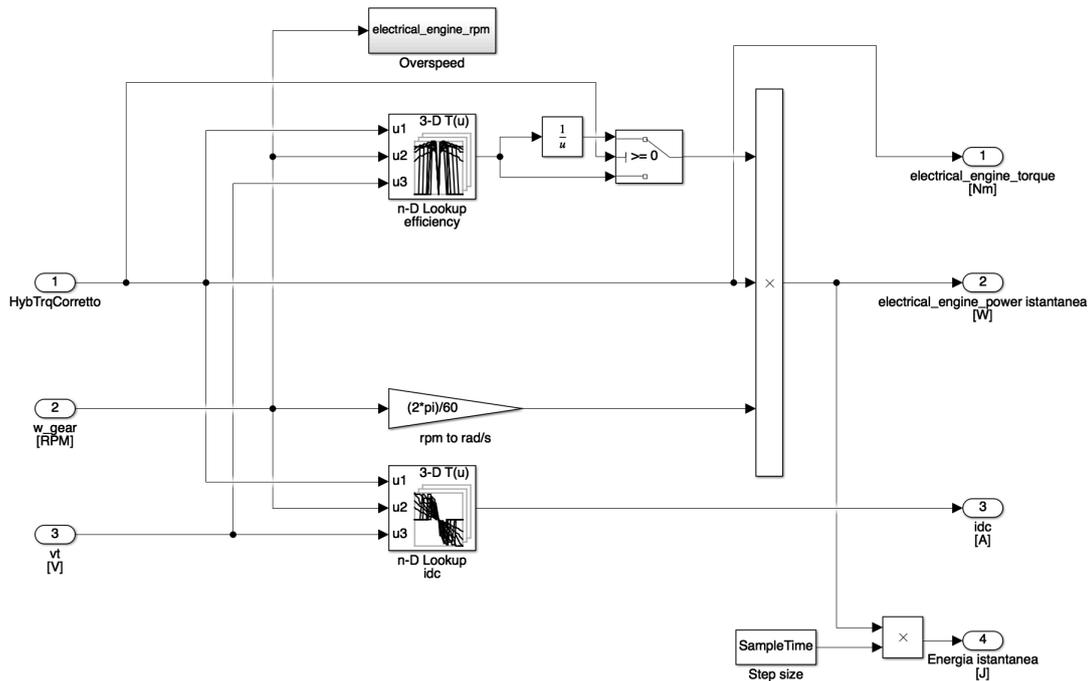


Fig.39: Electric motor.

Mentre il sottoinsieme del LiC si collega direttamente tramite il ramo della corrente:

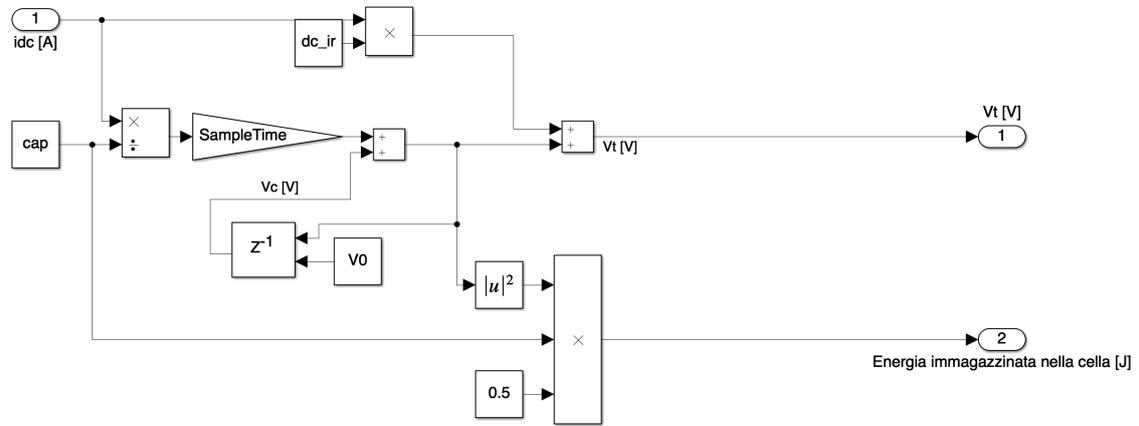


Fig.40: LiC.

I due sottoinsiemi dialogano così in maniera diretta, tramite i valori individuati su mappa e determinati a fronte di un dato noto di tensione.

5.4 Strategia

L'introduzione di componenti elettriche sulla vettura è legata a necessità di comfort.

La Lamborghini Aventador monta infatti un cambio sequenziale ISR a frizione singola, dove il cambio marcia prevede in sequenza tre fasi principali: l'apertura della frizione, l'inserimento della nuova marcia e la chiusura della frizione. Nel tempo in cui la frizione rimane aperta la coppia alle ruote risulterà nulla poiché il collegamento al motore è interrotto.

Per quanto il processo possa essere veloce, stimato intorno agli 0,2 s, comporta una lacuna che va colmata perché percepita e segnalata dagli utenti, soprattutto alle basse velocità.

Allo stesso tempo Lamborghini attribuisce grande importanza al problema ambientale, ne consegue l'idea di testare una vettura Lamborghini ibrida, capace di accoppiare la presenza di un motore elettrico al più classico motore a combustione interna al fine di limitare le emissioni e colmare la lacuna del cambio marcia.

La strategia impiegata come base per la simulazione è quella modellata dal gruppo di riferimento interno a R&D e che verrà impiegata direttamente in vettura. Verrà presa come punto di partenza e riadattata per una attività di simulazione che non ha necessità di lavorare in real time, con la possibilità dunque di garantire tempi di calcolo maggiori.

L'obiettivo della strategia è quello di garantire la copertura del buco di coppia rispettando i limiti associati al LiC, prevedendo anche la possibilità di recupero energetico in frenata.

In corrispondenza dell'apertura della frizione verrà inviato un segnale che abilita l'utilizzo del motore elettrico, a cui consegue la scarica del LiC. I due componenti sono direttamente collegati tra loro, con il LiC che funziona da "serbatoio" energetico.

Ricordiamo che nel modello non è simulato il comportamento della frizione, che verrà semplificata. In particolare, si individuano lo stato 0 per la frizione chiusa, 1 per la frizione in apertura, 2 per la frizione aperta e 3 per la frizione in chiusura. Si stima che la fase di apertura e chiusura abbiano la durata di due volte l'intervallo di integrazione. Queste informazioni sono necessarie come input alla strategia ed in prima approssimazione non necessitano di una modellazione approfondita, che potrà essere sviluppata successivamente.

In particolare, negli stati 1, 2 e 3 (rispettivamente di frizione in apertura, aperta ed in chiusura) approssimeremo il comportamento della frizione come se invece fosse completamente aperta. La coppia fornita dal motore in tale situazione è nulla e dunque la macchina elettrica sarà costretta a coprire richieste di coppia istantanee e non graduali, con la possibile nascita di problemi sulle correnti e sul LiC.

Un modello più accurato richiederebbe la modellazione dei transitori di apertura e chiusura, capaci di garantire una richiesta di coppia più “morbida” alla macchina elettrica e più attinente alla realtà.

La strategia richiede informazioni provenienti dal LiC, quali lo stato di carica e i limiti di funzionamento, e dalla macchina elettrica, come la disponibilità di coppia a fronte di una certa disponibilità energetica del LiC.

La coppia elettrica generata verrà sommata a quella proveniente dal termico e da queste verrà determinata la forza alle ruote.

La strategia adottata al momento per il motore elettrico non è dunque una strategia di split, ovvero la richiesta del driver non è suddivisa tra i due motori presenti in vettura, ma viene invece coperta unicamente dal termico. Il motore elettrico viene abilitato solo in fase di cambiata e, aggiungendo masse e componenti alla vettura, rischia di provocare un aumento dei consumi.

Non bisogna dimenticare dunque la possibilità di recupero energetico che ci permette di far lavorare il termico in migliori condizioni di funzionamento, secondo una modalità di “Load Point Shift”.

Intervenendo ulteriormente sulla strategia è evidente come un motore elettrico come quello installato possa garantire benefici in termini di riduzione dei consumi, che non rappresentano la priorità in questa fase di sviluppo.

5.5 Modelli Elettrici

Una volta modellate le componenti elettriche sarà necessario collegarle e inserirle all'interno del modello generale.

Dalle simulazioni che verranno effettuate ci aspettiamo principalmente di notare la copertura del buco di coppia, ed inoltre sarà interessante notare i processi di carica e scarica del LiC.

Per quanto riguarda i consumi, ci aspettiamo di rilevare risultati molto simili ai valori previsti dai test, ma in questa fase si potrebbero addirittura alzare a causa del maggiore peso della vettura.

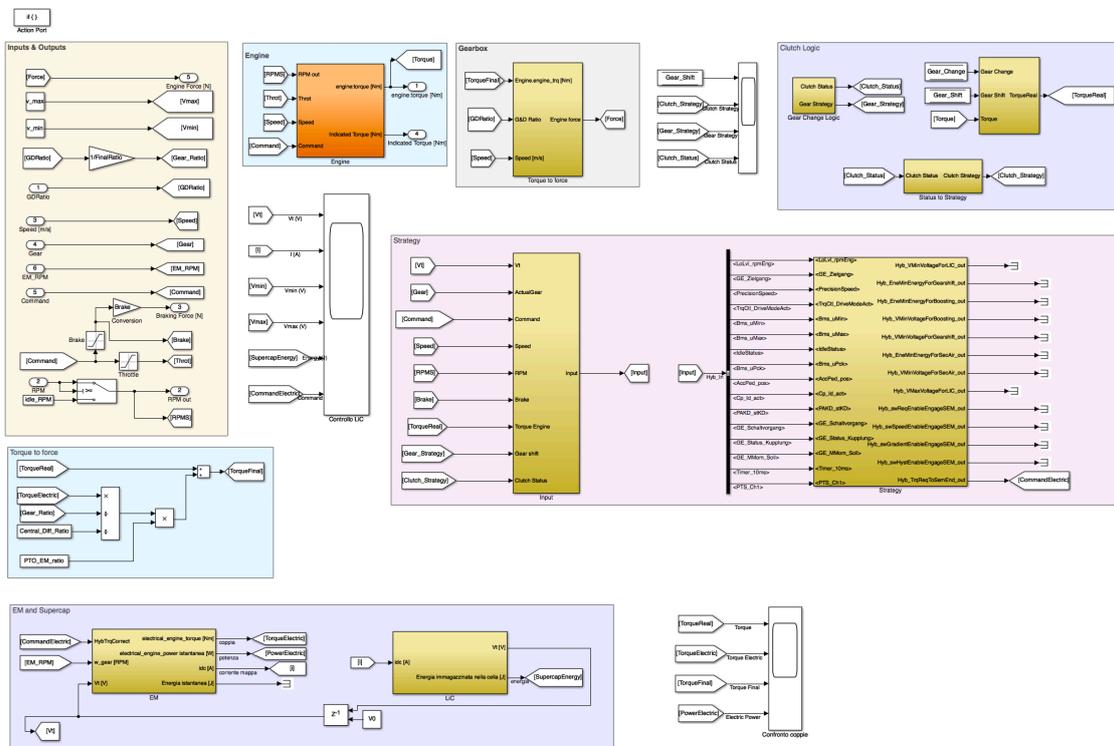


Fig.41: Complete model.

6 Caratterizzazione Cambio Aventador

6.1 Descrizione Prova

6.1.1 Obiettivo

L'obiettivo della prova è rappresentato dalla determinazione di una mappa della coppia persa dal cambio in funzione della velocità della vettura sul banco e della temperatura dell'olio. È possibile valutare anche la dipendenza dalla marcia inserita.

6.1.2 Svolgimento Prova

Lo svolgimento della prova prevede il posizionamento della vettura sul banco a rulli, con due ruote motrici posteriori. Il test verrà svolto a velocità costante (ad esempio 80 km/h) e con frizione aperta per evitare di portarsi dietro le perdite del motore (elimino il rendimento del motore, bisogna accertarsi che la centralina mantenga la frizione aperta).

Mantenendo la vettura in folle l'albero primario del cambio sarebbe fermo e parte delle perdite (ad esempio dovute ad alcuni cuscinetti) non verrebbero misurate, conseguentemente si svolgerà la prova a marcia inserita.

Bisogna tener conto della presenza del differenziale, la cui temperatura verrà monitorata mediante una termocoppia.

Per quanto riguarda gli pneumatici andranno fatte stime e valutazioni sulle perdite associate.

Dalla prova verrà misurata la forza di trazione sul rullo o la coppia associata, che permettono di quantificare il valore della coppia persa.

La temperatura dell'olio verrà controllata tramite l'accensione e spegnimento del motore per fare sì che vari abbastanza lentamente da essere facilmente misurabile, ma, allo stesso tempo, abbastanza velocemente da rendere i tempi della prova accettabili.

Si svolgerà la prova a diverse velocità (20 km/h, 50 km/h, 70 km/h, 100 km/h) e con diverse marce inserite.

Si nota che al primario del cambio non sono collegate pompe di lubrificazione ausiliari, perciò la variazione delle coppie perse in funzione della marcia inserita dipende principalmente dagli attriti di rotolamento dell'albero primario.

6.1.2 Schema Prova

Riassumendo:

- Velocità (km/h): 20, 50, 70, 100.
- Marcia inserita: I, IV, VII e II, V.
- Frizione: sempre aperta per evitare il trascinarsi del motore.
- Motore: utilizzato per variare la temperatura dell'olio.

Variabili da misurare:

- Temperatura olio, scaldato a 20-40-60-80°C con motore e scambiatore calore.
- Forza di trazione al rullo.

6.2 Road Map Prova

L'utilizzo di due tranches di prova è necessario per lasciare alla vettura il tempo di raffreddarsi. I tempi di raffreddamento sono significativi, di conseguenza, raggiunto un breakpoint di temperatura sarà necessario svolgere le prove inserendo le varie marce e modificando le velocità per poi riaccendere il motore e riprendere ad aumentare la temperatura.

È possibile procedere al cambio marcia con innesto manuale tenendo la frizione aperta, sarà sufficiente riportare le ruote a velocità nulla per evitare danneggiamenti.

Le rilevazioni dei dati vengono effettuate aspettando il tempo necessario perché le grandezze di interesse si stabilizzino. In particolare, la temperatura dell'olio del cambio viene letta dal controllo del cambio stesso attraverso la centralina in vettura, mentre la temperatura del differenziale e la forza di trazione al rullo vengono lette dalla strumentazione presente in sala prove, ad esempio collegando la termocoppia montata sul differenziale posteriore alla "giraffa".

Grandezze misurate:

- Temperatura del differenziale.
- Temperatura dell'olio del cambio.
- Forza di trazione al rullo.

Indicatore	Temperatura (°C)	Marcia	Velocità (km/h)
1	20	I	20
2	40	IV	50
3	60	VII	70
4	80		100

Table 8: Operating points.

6.2.1 Primo Breakpoint

La prova inizia con la disposizione della vettura sul banco.

La vettura è già strumentata, connesso tutti i sensori coi sistemi di rilevazione e individuo le grandezze iniziali in ambiente.

Viene inserita la prima marcia e aperta la frizione.

Viene avviato il rullo per raggiungere il primo breakpoint di velocità, è un processo molto veloce, ovviamente porta ad un aumento di temperatura,

conseguentemente la prima temperatura di analisi impostata sarà inferiore al valore desiderato.

Riassumendo la situazione di partenza desiderata:

Temperatura (°C)	Marcia	Velocità (km/h)
17, inferiore rispetto ai 20 desiderati	I	20

Se necessario avviamo il motore per raggiungere il primo breakpoint di temperatura, ma inizialmente ci basiamo sulla temperatura rilevata in camera (qui stimata pari a 20°C).

Avviato il ciclo di omologazione, verifico che la temperatura dell'olio sia quella desiderata e procedo con la rilevazione dei dati di interesse.

Rilevo i dati a:

T1	M1	V1
----	----	----

Cambio velocità, rilievo:

T1	M1	V2
----	----	----

Cambio velocità, rilievo:

T1	M1	V3
----	----	----

Cambio velocità, rilievo:

T1	M1	V4
----	----	----

Una volta che sono state misurate tutte le velocità, la temperatura dell'olio del cambio è aumentata significativamente, rendendo chiaro che uno dei limiti principali della prova è rappresentato dalla difficoltà nel mantenere costante tale grandezza.

Contestualmente stiamo monitorando anche la temperatura del differenziale, che varia invece molto poco.

La rilevazione continua e ci permetterà di individuare dati associati a breakpoint diversi da quelli desiderati.

Proseguo inserendo la marcia successiva:

Temperatura (°C)	Marcia	Velocità (km/h)
Intorno a 30	IV	20

Rilevo a:

T1	M2	V1
----	----	----

Cambio velocità e rilievo:

T1	M2	V2
----	----	----

Cambio velocità e rilievo:

T1	M2	V3
----	----	----

Cambio velocità, rilievo:

T1	M2	V4
----	----	----

Le temperature raggiunte risultano essere eccessivamente elevate per includere le misurazioni della settima marcia nel range dei 20°C.

6.2.2 Secondo Breakpoint

Concludo così il primo breakpoint di temperatura e posso salire al secondo e svolgere lo stesso procedimento. Non è necessario accendere il motore per scaldare l'olio del cambio e raggiungere la temperatura desiderata, infatti le temperature raggiunte a seguito delle prime misurazioni sono prossime ai 40°C. Effettuo le misurazioni partendo dall'ultima marcia impostata, ovvero la VII e faccio girare il rullo alla prima velocità da analizzare:

Temperatura (°C)	Marcia	Velocità (km/h)
Intorno a 40°C	VII	20

Una volta avviato il ciclo di omologazione, rilevo i dati a:

T2	M3	V1
----	----	----

Cambio velocità, rilievo:

T2	M3	V2
----	----	----

Cambio velocità, rilievo:

T2	M3	V3
----	----	----

Cambio velocità, rilievo:

T2	M3	V4
----	----	----

Cambio marcia e arrivo al secondo breakpoint:

Temperatura (°C)	Marcia	Velocità (km/h)
------------------	--------	-----------------

Intorno a 40	I	20
--------------	---	----

Rilevo a:

T2	M1	V1
----	----	----

Cambio velocità e rilevato:

T2	M1	V2
----	----	----

Cambio velocità e rilevato:

T2	M1	V3
----	----	----

Cambio velocità, rilevato:

T2	M1	V4
----	----	----

Cambio marcia e rilevato il terzo breakpoint.

Temperatura (°C)	Marcia	Velocità (km/h)
Intorno a 40	IV	20

Rilevo a:

T2	M2	V1
----	----	----

Cambio velocità e rilevato:

T2	M2	V2
----	----	----

Cambio velocità e rilevato:

T2	M2	V3
----	----	----

Cambio velocità, rilevato:

T2	M2	V4
----	----	----

Concludo il secondo breakpoint raggiungendo temperature elevate, ma che non presentano una differenza eccessiva dai 40°C desiderati.

6.2.3 Terzo Breakpoint

Concludo così il secondo breakpoint di temperatura e posso salire al terzo e svolgere lo stesso procedimento.

Non è necessario accendere il motore per scaldare l'olio a causa delle elevate temperature raggiunte nel corso delle precedenti misurazioni.

Nel corso della prova, attraverso l'analisi dei dati parziali registrati, si è notato che a basse marce sono associate maggiori forze al rullo, che sono indicative di

una maggiore resistenza al rotolamento da parte degli alberi del cambio. Ne conseguono dunque attriti maggiori ed un maggiore riscaldamento dell'olio del cambio.

Per cui si inizia la prova partendo dalla settima marcia, con l'obiettivo di mantenere la temperatura dell'olio del cambio a livelli più controllati e garantire dunque misurazioni più attinenti al range ipotizzato.

Inizio a:

Temperatura (°C)	Marcia	Velocità (km/h)
55, inferiore rispetto ai 60 desiderati	VII	20

Rilevo i dati a:

T3	M3	V1
----	----	----

Cambio velocità, rilievo:

T3	M3	V2
----	----	----

Cambio velocità, rilievo:

T3	M3	V3
----	----	----

Cambio velocità, rilievo:

T3	M3	V4
----	----	----

Cambio marcia e arrivo a secondo breakpoint:

Temperatura (°C)	Marcia	Velocità (km/h)
Intorno a 60	IV	20

Rilevo a:

T3	M2	V1
----	----	----

Cambio velocità e rilievo:

T3	M2	V2
----	----	----

Cambio velocità e rilievo:

T3	M2	V3
----	----	----

Cambio velocità, rilievo:

T3	M2	V4
----	----	----

Cambio marcia e rilevamento il terzo breakpoint.

Temperatura (°C)	Marcia	Velocità (km/h)
Intorno a 60	I	20

Rilevo a:

T3	M1	V1
----	----	----

Cambio velocità e rilevamento:

T3	M1	V2
----	----	----

Cambio velocità e rilevamento:

T3	M1	V3
----	----	----

Cambio velocità, rilevamento:

T3	M1	V4
----	----	----

La temperatura dell'olio si mantiene stabile sui 60°C, permettendoci di rimanere nel range previsto.

Le misurazioni svolte finora mostrano che il comportamento della vettura dipende in maniera significativa dalla marcia inserita, conseguentemente vengono svolte prove a 60°C anche in seconda e quinta marcia indicata rispettivamente come MII e MV.

Rilevo a:

T3	MV	V1
----	----	----

Cambio velocità e rilevamento:

T3	MV	V2
----	----	----

Cambio velocità e rilevamento:

T3	MV	V3
----	----	----

Cambio velocità, rilevamento:

T3	MV	V4
----	----	----

Cambio velocità e rilevamento a:

T3	MII	V1
----	-----	----

Cambio velocità e rilevamento:

T3	MII	V2
----	-----	----

Cambio velocità e rilevamento:

T3	MII	V3
----	-----	----

Cambio velocità, rilievo:

T3	MII	V4
----	-----	----

6.2.4 Quarto Breakpoint

Terminato il terzo breakpoint di temperatura si prosegue la prova raggiungendo il quarto breakpoint, ovvero 80°C.

Al fine di raggiungere l'ultimo livello di temperatura viene acceso il motore e si porta il liquido di raffreddamento a 85°C.

Contestualmente ci saremmo aspettati un riscaldamento dell'olio del cambio, che però non si verifica. La causa di questo fenomeno è stata successivamente attribuita all'accensione della ventola di raffreddamento, utilizzata nei laboratori emissioni per simulare il vento di corsa e che raffredda il cambio tramite le alettature presenti nella coppa dell'olio dello stesso, il cui contributo potrebbe essere tale da eliminare l'effetto di riscaldamento dato dal liquido di raffreddamento.

La prova potrebbe proseguire andando a scaldare l'olio unicamente grazie al contributo dei rulli, ma questo processo può portare ad affaticamento la frizione, che è costretta a rimanere aperta per tempi lunghi quando normalmente lavora chiusa. La conseguenza di questo processo potrebbe essere un surriscaldamento di alcune componenti meccaniche in gioco, anche a causa degli attriti tra i dischi della frizione che non possono essere completamente rimossi.

Conseguentemente si decide di interrompere la prova.

6.3 Conclusioni

La prova è stata svolta all'interno di un intervallo di temperatura dell'olio del cambio compreso indicativamente tra 20°C e 60°C. La temperatura iniziale è data dalla temperatura ambiente presente in sala prove ad inizio giornata, mentre il limite superiore viene raggiunto riscaldando volontariamente l'olio.

Andando a simulare un ciclo NEDC sulla vettura testata, otterremo il seguente profilo:

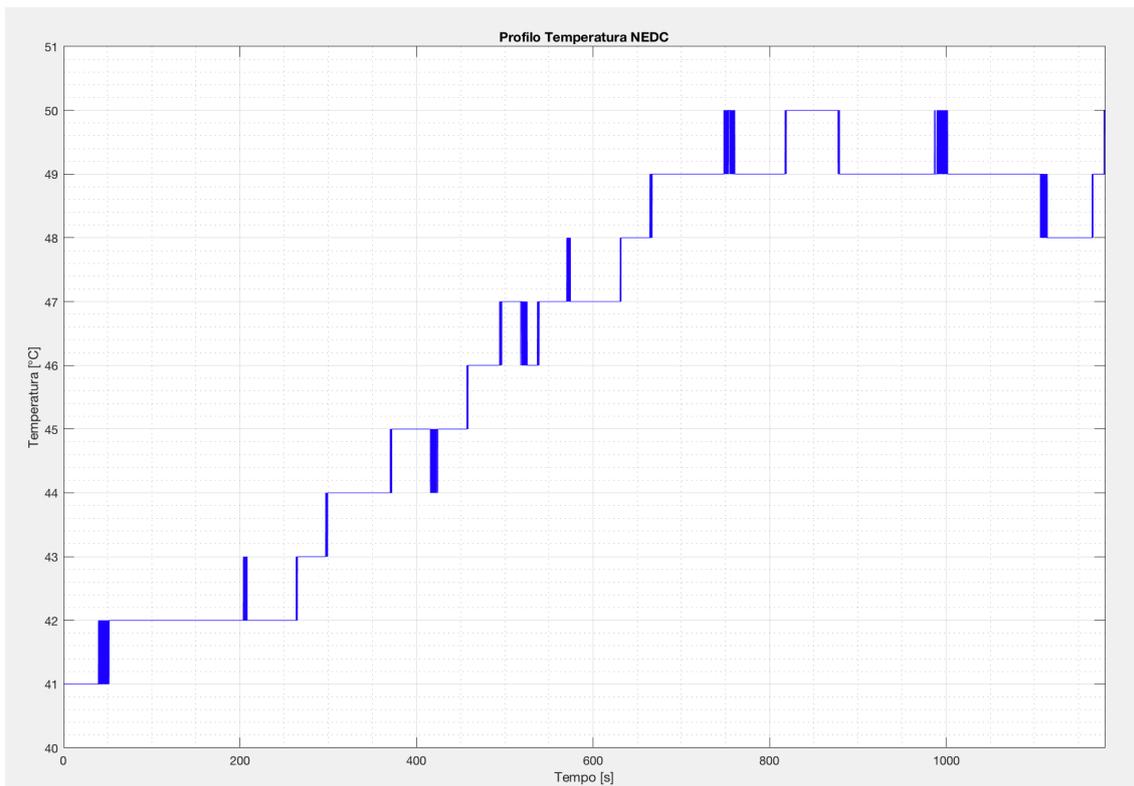


Fig.42: NEDC oil gearbox temperature.

Si nota che le temperature rimangono all'interno di una finestra compresa tra i 40°C ed i 50°C, coperte quindi dalle misurazioni effettuate.

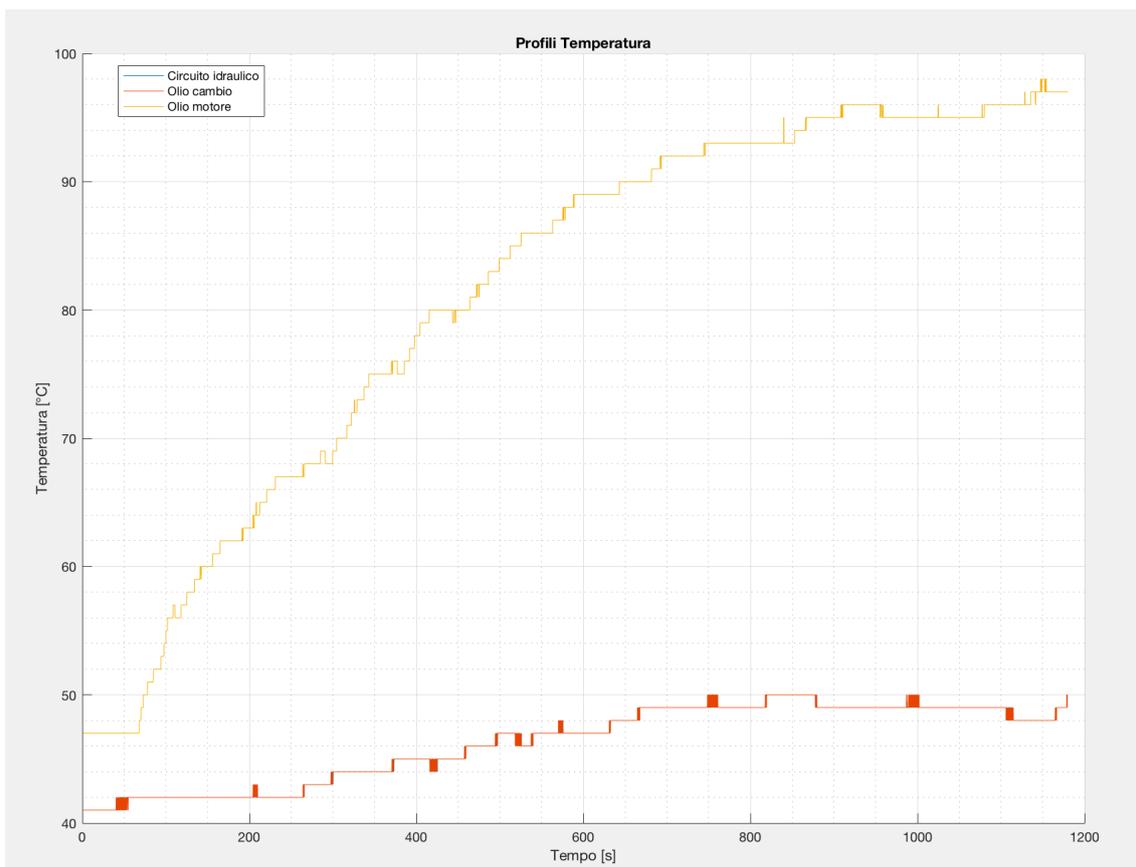


Fig.43: NEDC oil temperature.

Nel caso in cui fosse necessario estendere l'intervallo di analisi, raggiungendo ad esempio gli 80°C, potremmo pensare di scaldare l'olio in altro modo, in particolare si registra il fatto che l'accensione del motore termico non permetterebbe di raggiungere le temperature richieste, come visto nel ciclo NEDC svolto.

La temperatura dell'olio del cambio rimane attorno ai 40°C anche nel caso in cui si parli di test real drive su vetture cittadine. [32]

Una possibile causa che andrebbe indagata per le basse temperature dell'olio è rappresentata dall'accensione della ventola di raffreddamento in sala prove, se verificato, il suo effetto potrebbe essere anche usato per raffreddare l'olio del cambio in modo da ripetere test a bassa temperatura.

Le cause del mancato riscaldamento dell'olio potrebbero essere ricercate anche sotto altri aspetti, un primo passo sarebbe rappresentato dal controllo della struttura del circuito e dello scambiatore acqua olio.

Come notato sperimentalmente, a marce basse aumentano le forze necessarie al rullo e gli attriti, questo può essere verificato anche teoricamente.

Infatti alzando la marcia si abbassa il rapporto di trasmissione, quindi dato che:

$$\omega_{\text{primario}} = \omega_{\text{ruote}} \cdot \tau$$

a velocità costante delle ruote, un abbassamento di τ comporta un abbassamento della velocità del primario. Conseguentemente le friction diminuiscono.

Dai risultati ottenuti si nota la forte dipendenza del sistema dalla marcia inserita, sarebbe opportuno svolgere la prova testando tutte le marce disponibili per una maggiore completezza.

Conclusa la prova ho determinato, partendo dalle misurazioni, la media della forza di trazione del rullo, per avere un dato più affidabile della singola lettura. Lo stesso ragionamento verrà svolto per le temperature dell'olio del cambio al fine di determinare un valore più accurato.

Il dato può essere convertito in un valore di coppia necessario per movimentare il cambio a fronte della conoscenza del raggio dello pneumatico sotto carico.

Il contributo di coppia determinato comprende però la movimentazione di tutte le componenti situate tra rullo e cambio stesso, di conseguenza include anche gli pneumatici e l'assale.

Anche il differenziale posteriore è compreso, ma si è deciso di non stimare le perdite al suo interno e considerare invece il sistema di cambio e differenziale come un blocco unico. Viene comunque monitorata la temperatura del differenziale con una termocoppia in modo tale da tenere sotto controllo il comportamento dell'olio al suo interno, non vengono registrati particolari cambiamenti.

Andremo a valutare il contributo di coppia persa degli pneumatici (8x1000) ed il contributo dell'assale, questi dati verranno stimati e rimossi dalle misure effettuate, in modo da determinare una coppia persa riferita unicamente al sistema del cambio (primario+secondario) e del differenziale.

Il valore di coppia persa verrà inserito nel modello e impiegato per conoscere le perdite.

Si nota che il dato fornito per la I marcia a 90 km/h è ottenuto in condizioni di funzionamento molto gravose per la vettura e non contemplate nel normale funzionamento, per cui potrebbe essere ignorato nelle nostre considerazioni.

Si potrebbe fare riferimento al valore di potenza persa per una migliore caratterizzazione dei risultati, in maniera tale da includere in un'unica informazione l'effetto delle velocità e della forza di trazione stessa (marcia e temperatura).

6.3.1 Analisi dei Dati

I dati ottenuti descrivono le perdite dell'intero blocco di trasmissione che fa da intermediario tra il motore termico e le ruote. Esistono vari test effettuati su strada che descrivono le perdite della vettura Aventador ed a cui possiamo riferirci in alternativa alle prove da noi svolte.

In particolare, conosciamo le perdite agli assali, dove la formula viene determinata facendo riferimento a prove di coast-down svolte su pista a Nardò con un vettura Aventador S. In particolare, l'idea che sta dietro alla prova è quella di portare la vettura a $250 \frac{km}{h}$ e in quel momento mettere in folle su quello che è un percorso considerato di rettilineo infinito (sterzo senza curvatura). La macchina decelera fino ai $20 \frac{km}{h}$ a causa degli attriti di rotolamento ed aerodinamici e se ne conosce il profilo di velocità nel tempo.

Il coefficiente C_x di resistenza aerodinamica è noto, tenendo dunque in considerazione l'entità di tale contributo, possiamo risalire agli attriti di rotolamento. Tali attriti sono da attribuirsi agli pneumatici, gli assali, il PTO (Power Take Off), i differenziali e l'albero secondario del cambio.

La formula che si determina è una quadratica della velocità:

$$RR = F_z * (q_1 + q_3 * (V/V_{ref}))$$

Dove F_z carico verticale effettivo sull'assale (espresso in N), V velocità di avanzamento del veicolo (espresso in m/s) e $V_{ref} = 22,2 \frac{m}{s}$.

I coefficienti sono pari a: $q_{1_front} = 0,02104$, $q_{3_front} = 0,009$, $q_{1_rear} = 0,01928$, $q_{3_rear} = 0,009$.

Se volessi invece stimare il solo contributo degli pneumatici, la resistenza al rotolamento viene vista come una forza orizzontale pari a $0,008 \cdot F_z$, dove la F_z è la forza verticale.

Il coefficiente di resistenza al rotolamento $C_{rr} = 0,008$ può essere assunto come costante fino alla velocità di $120 \frac{km}{h}$, successivamente cresce con la velocità.

Queste formulazioni si sostituirebbero alla stima proposta da Genta [34].

$$\eta = t_0 + t_1 \cdot v + t_2 \cdot v^2$$

Le misure da noi realizzate potrebbero rappresentare una base per la determinazione di un modello che permetta di stimare le perdite nella trasmissione, dovute principalmente al rotolamento (dipendente dalla velocità degli alberi del cambio oltre che dalla tipologia e dalla temperatura dell'olio di lubrificazione) ed agli attriti tra ingranaggi (legati a rapporto di trasmissione, design dei denti, coppia applicata e velocità di rotazione).

In prima approssimazione le grandezze misurate andranno inserite nel modello Simulink come semplici mappe black-box. In secondo luogo, siamo andati a graficare le potenze perse dalla trasmissione in funzione della velocità del primario, a fissata temperatura dell'olio e a fissata marcia ingranata.

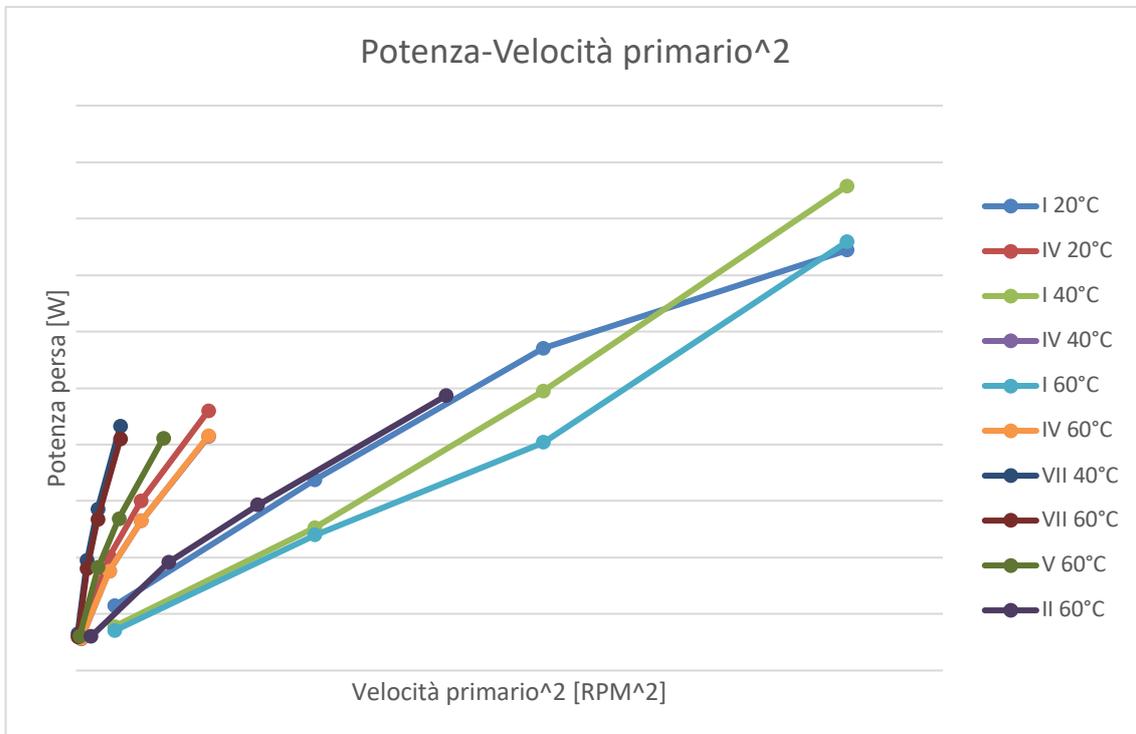


Fig.44: Power-(primary speed)^2.

Il diagramma riporta tutte le misure effettuate, isoliamo le misurazioni a temperatura fissata di 60°C:

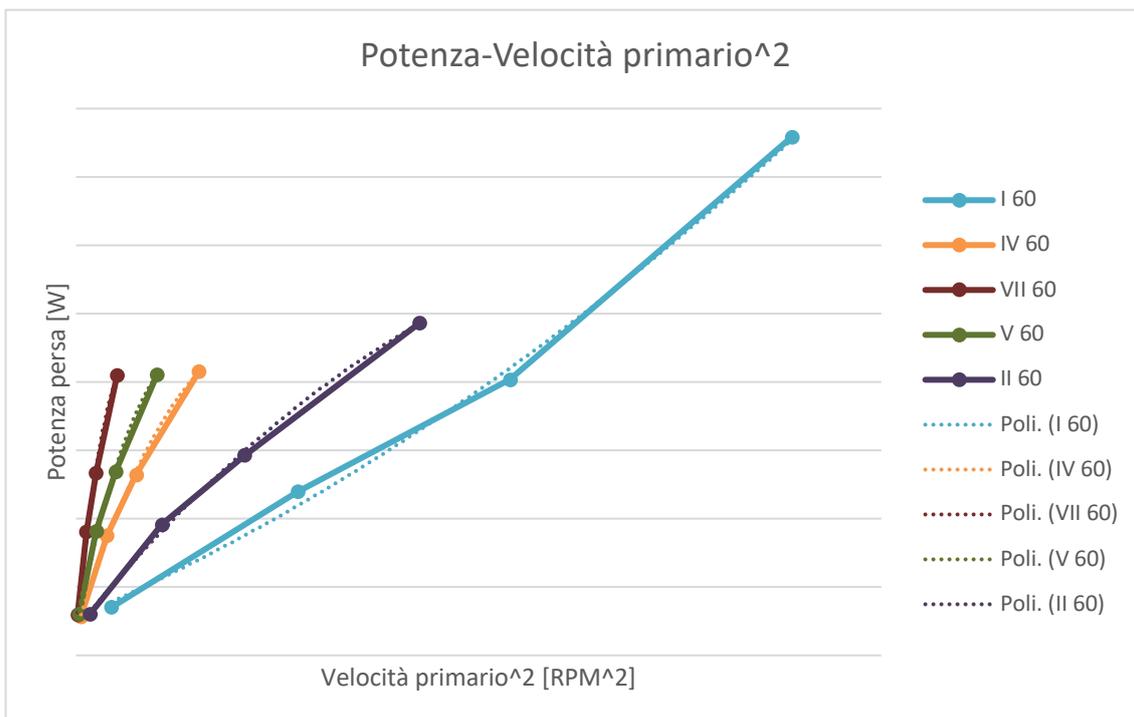


Fig.45: Power-(primary speed)² at 60°C.

Come detto le prove sono state svolte a velocità vettura fissate, tra i 20 km/h ed i 100 km/h.

È evidente dal grafico come le basse marce siano associate a velocità del primario più elevate (reso ancora più chiaro dal fatto che l'asse x riporta velocità elevate al quadrato). Le alte velocità raggiunte sono sinonimo di elevate potenze perse a causa dei fenomeni di rotolamento e agli attriti tra i denti degli ingranaggi.

Dalla terza marcia in su i rapporti di trasmissione al cambio diventano molto simili e ci garantiscono potenze perse prossime le une alle altre.

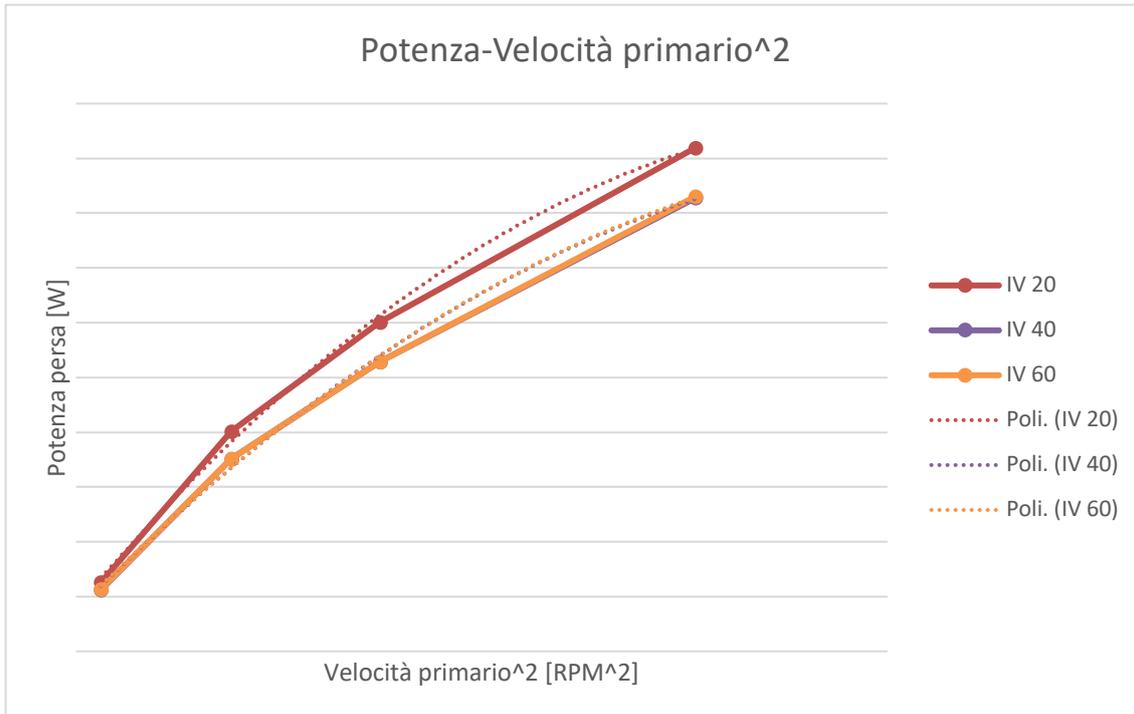


Fig.46: Power-(primary speed)^2 in 4th gear.

Fissata la marcia e dunque il rapporto di trasmissione, è facile notare il contributo della temperatura dell'olio del cambio. Infatti a temperature più elevate la viscosità dell'olio diminuirà andando a garantire minori potenze perse.

Come dimostrato sperimentalmente la temperatura dell'olio del cambio in cicli real drive non si allontana dai 40-50°C, rientrando appieno negli intervalli misurati.

Il contributo della temperatura è più evidente a basse marce, dove la dispersione dei dati è molto maggiore.

L'idea che sta dietro alla prova è quella di determinare una funzione della potenza persa che prenda in considerazione un valore costante associato alle perdite dalle ruote all'albero secondario del cambio ed un valore dipendente invece dalla velocità del primario del cambio.

$$P = P_{\text{secondario}} + k \cdot \omega^n$$

Il valore di potenza al secondario dipenderà principalmente da fenomeni di attrito legati alla rotazione, quindi dalle velocità in gioco e dalla tipologia e temperatura dell'olio, oltre alla eventuale presenza di ausiliari. Per il valore di potenza persa dipendente invece dalla velocità del primario (e quindi dal rapporto di trasmissione) si ricerca una proporzionalità lineare associata ad un coefficiente k che includerà gli attriti di rotazione ed anche quelli dovuti al contatto tra i denti (coppia applicata, velocità, design e rapporto di trasmissione).

Andiamo dunque ad analizzare i dati misurati, ricerchiamo una linearità tra le misure a temperatura e velocità fissata disegnandone i grafici in funzione di potenza persa e velocità del primario elevato alla n , dove i valori di n considerati sono $n = 2$ o $n = 3$.

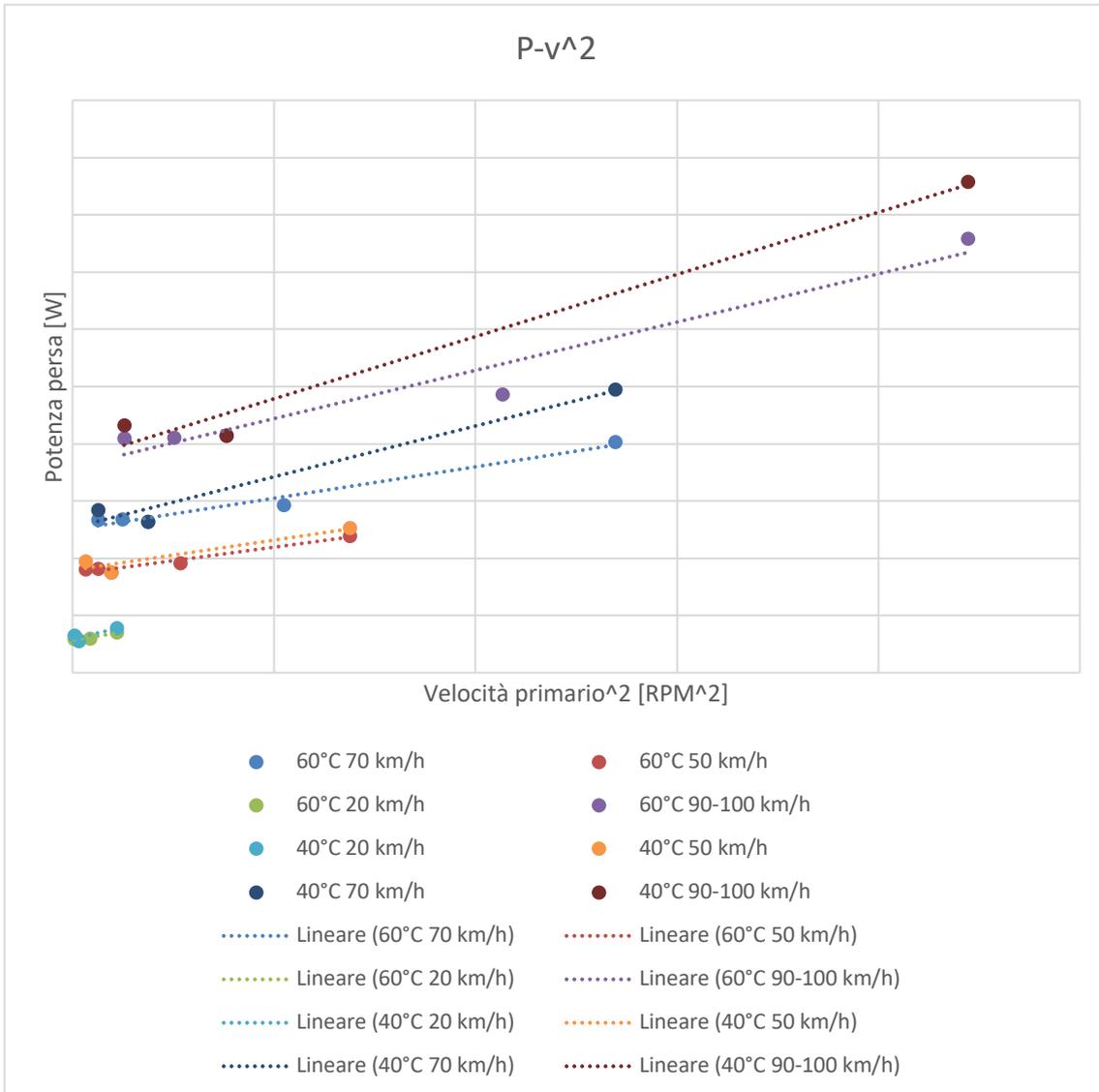


Fig.47: Power-(primary speed)² trend at same speed.

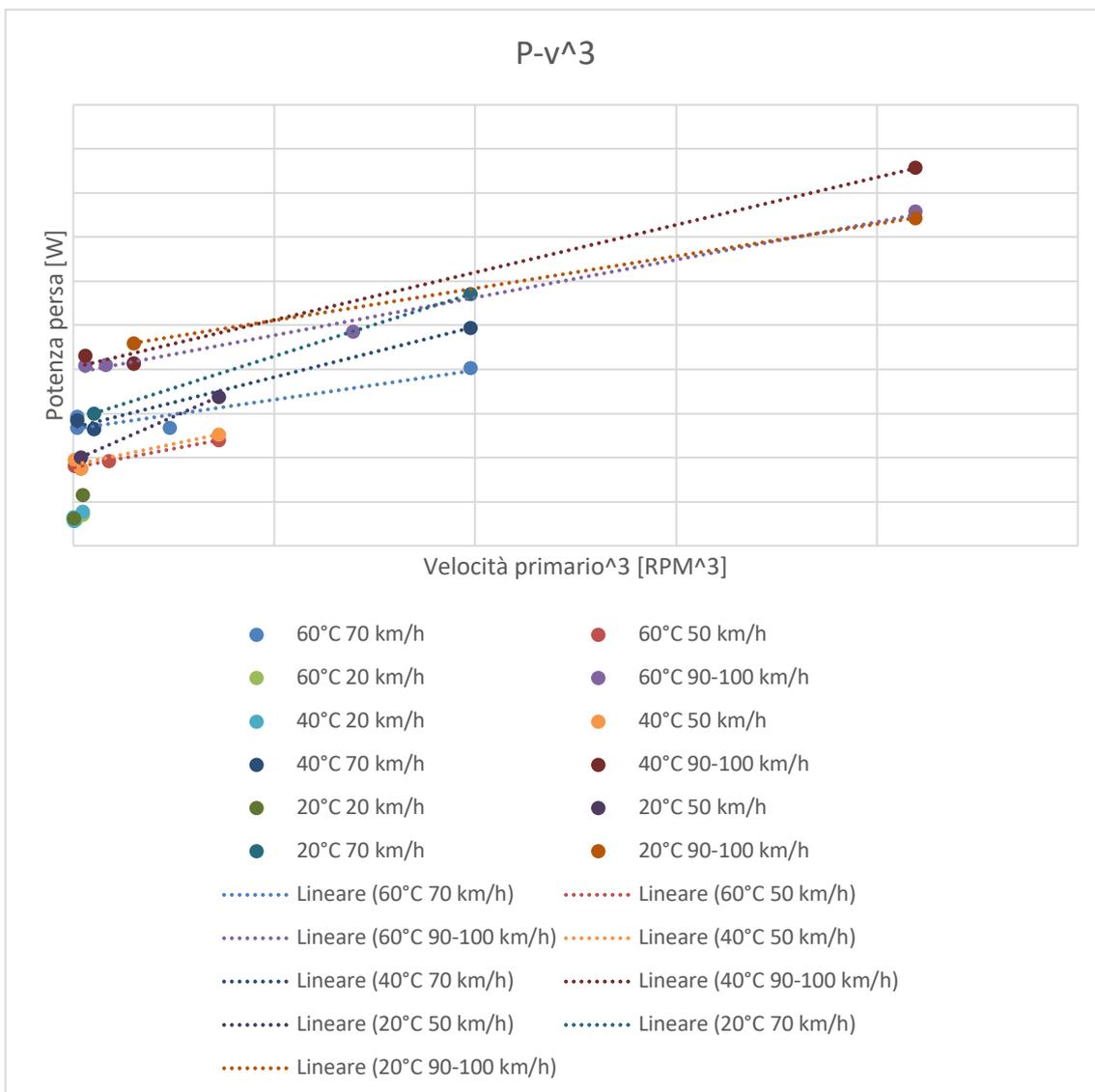


Fig.48: Power-(primary speed)³ trend at same speed.

Visualizzando il valore assunto dal coefficiente di regressione lineare, si nota che la dipendenza lineare è accettabile rispetto ad entrambi i valori di n .

Si deduce dai diagrammi che la potenza al secondario dipende principalmente dalla velocità e, in misura minore, dai fenomeni viscosi legati alla tipologia ed alla temperatura dell'olio. Non dipende invece dal rapporto di trasmissione del cambio.

La componente lineare dipende in modo esplicito dalla velocità del primario e di conseguenza, dal rapporto di trasmissione. La costante di proporzionalità si mantiene circa costante per tutte le prove svolte, ma a basse temperature inizia a crescere, associata a maggiori perdite.

k è dunque dipendente dalla temperatura ma potrebbe essere considerata costante nel caso di normale funzionamento, dove le temperature dell'olio del cambio si mantengono intorno ai 40-50°C.

Di seguito andiamo a riportare i diagrammi che identificano l'andamento della $P_{\text{secondario}}$ e della k, a fronte di un indice $n = 3$. Per semplicità ipotizzeremo una temperatura di 50°C.

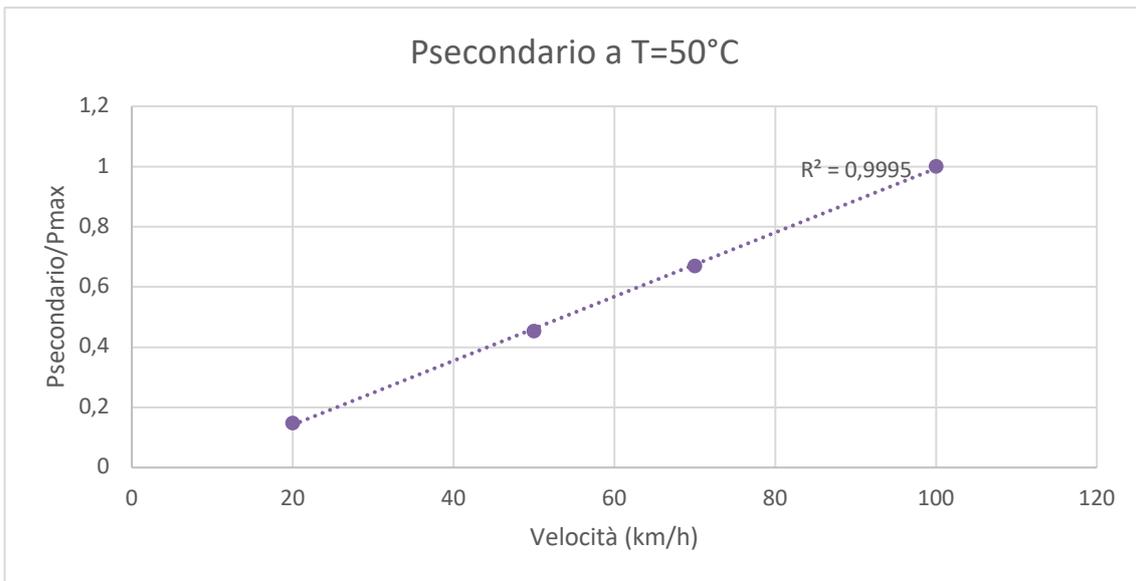


Fig.49: Psecondario at 50°C.

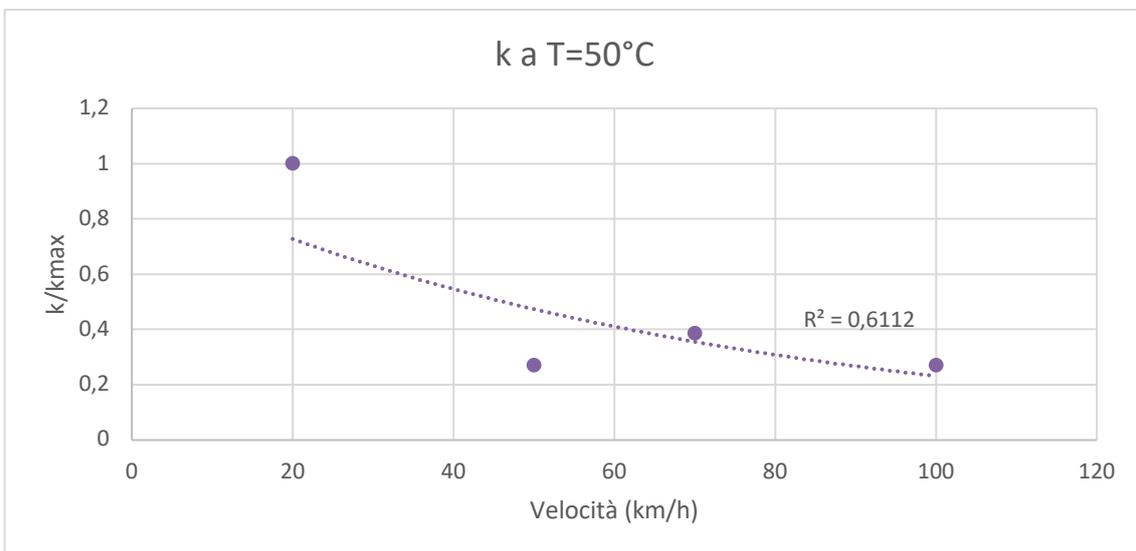


Fig.50: k at 50°C.

I dati misurati potrebbero rappresentare la base per la costruzione di un modello delle perdite nel cambio, capace di indicarci la potenza persa nota la velocità della vettura, la marcia inserita e la temperatura dell'olio.

6.4 Dettagli Modellazione

La grandezza misurata è la forza di trazione al rullo, corrispondente alla forza persa per movimentare il blocco di trasmissione.

Verrà monitorata la temperatura del differenziale mediante una termocoppia appoggiata sullo stesso, di questo non si conosceranno in modo esatto le perdite.

All'interno del modello Lambo il blocco di trasmissione viene schematizzato con un semplice parametro di efficienza che moltiplica la coppia motrice.

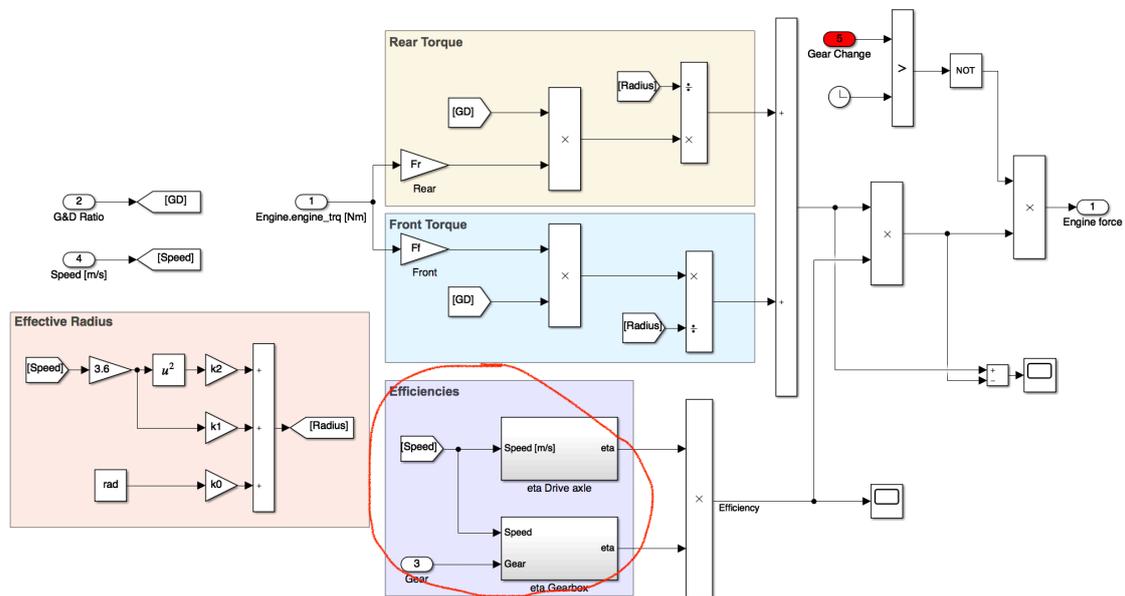


Fig.51: Lambo model (1).

In secondo luogo, si ritrova il contributo delle perdite per rotolamento, determinato a partire dalla formula proposta da Wong, [35], dipendente dalla velocità.

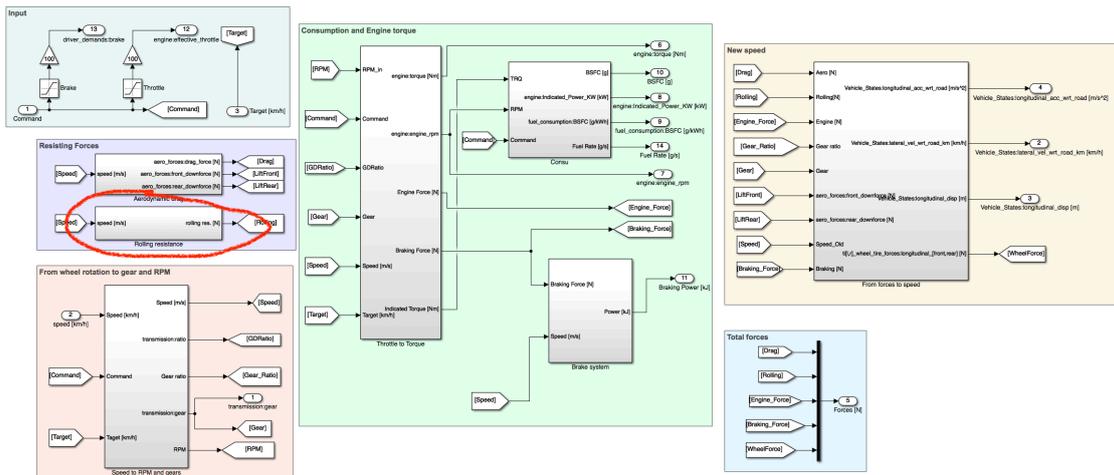


Fig.52: Lambo model (2).

Tale formulazione riproduce in maniera corretta il fenomeno, in particolare portando a zero le resistenze nel caso in cui la macchina sia ferma.

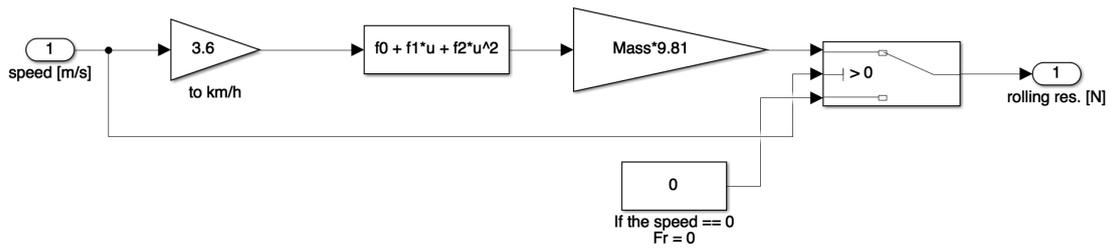


Fig.53: Lambo model (3).

Al fine di introdurre le nostre misure andremo a rimuovere i contributi illustrati.

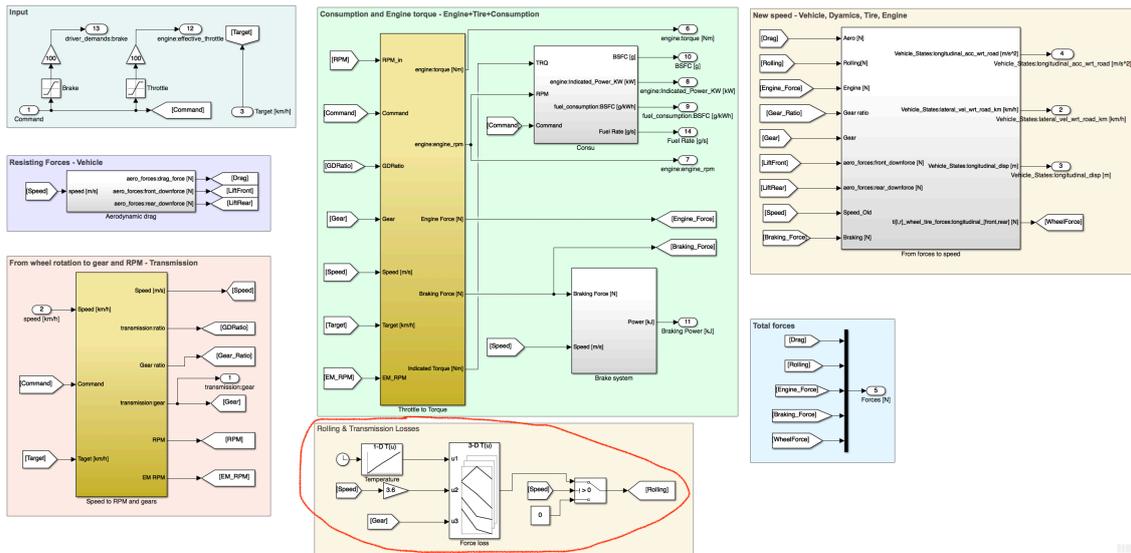


Fig.54: Experimental gearbox.

La termica dell'olio è basata su misure effettuate in laboratorio emissioni, ad esempio un ciclo NEDC da noi svolto.

La tabella introdotta sarà dipendente dalla temperatura dell'olio nel cambio, dalla marcia ingranata e dalla velocità del veicolo (legata agli RPM).

Le misure ottenute verranno interpolate linearmente per poter valutare anche i punti non misurati, i dati che ne derivano saranno compromessi da questa approssimazione molto forte. Inoltre, poniamo a zero le perdite associate al funzionamento a velocità nulla.

7 Ulteriori Modifiche e Sviluppi Futuri

7.1 CDS (Cylinder Deactivation System)

I dati forniti da Lamborghini si riferiscono alla vettura Aventador, ma non prevedono la disattivazione dei cilindri in mancanza di test in sala prove motori. La tecnologia è però presente sulla vettura reale e, conseguentemente, i test di emissioni riporteranno risultati che ne includono l'attivazione.

La disattivazione dei cilindri è una tecnologia che prevede l'interruzione dell'iniezione di combustibile, facendo sì che il motore V12 montato in vettura funzioni secondo una modalità a 6 cilindri in linea. Infatti, in condizioni di pedale costante e velocità costante, viene disattivata l'iniezione su una delle due bancate, lasciando i pistoni liberi di muoversi (con conseguente lavoro di pompaggio). [36]

In uscita ad ogni bancata è presente un catalizzatore, che va mantenuto sopra le soglie di temperatura minima per garantirne il corretto funzionamento. Mentre la bancata accesa continua a funzionare normalmente, la bancata spenta sarà attraversata da aria, con un conseguente calo di temperatura. Al raggiungimento dei limiti stabiliti verrà invertita la bancata accesa in maniera tale da non portare mai i catalizzatori in campi di funzionamento indesiderati.

La tecnologia rappresenta una risorsa molto importante nella riduzione dei consumi, soprattutto nel ciclo extraurbano (e dunque sulle misure combinate).

Dal momento che la modellazione del fenomeno è complessa, si è deciso di basare il modello su una serie di ipotesi di funzionamento semplificative. Si considera che nel momento in cui siamo a regime costante e le condizioni per la disattivazione dei cilindri sono raggiunte, allora una delle bancate del motore viene disattivata e la cilindrata viene dimezzata.

Nella prima parte del ciclo NEDC urbana il contributo della disattivazione dei cilindri è trascurabile e di conseguenza non viene simulato. Nella fase extraurbana si attiva invece la simulazione.

Le condizioni che comportano la disattivazione dei cilindri sono definite dalla posizione del pedale e dalla velocità della vettura. Si procede con la disattivazione nel caso in cui la posizione del pedale venga modificata al massimo del 5%.

Per quanto riguarda la variazione di velocità, si sono osservate le accelerazioni tipiche della vettura in un ciclo NEDC e, a fronte di questa informazione, si è stabilita una soglia che ci permetta di considerare la vettura a velocità costante.

Il modello potrebbe essere sviluppato ulteriormente per garantire una più corretta ed accurata simulazione del fenomeno.

7.2 Frizione

Come spiegato precedentemente, l'introduzione di un modello di frizione è necessaria al fine di scambiare informazioni nel modo corretto con la strategia.

In particolare, si individuano lo stato 0 per la frizione chiusa, 1 per la frizione in apertura, 2 per la frizione aperta e 3 per la frizione in chiusura. Si stima che la fase di apertura e chiusura abbiano la durata di due volte l'intervallo di integrazione.

Per semplicità, non sono al momento modellati i transitori di apertura e chiusura della frizione, capaci di garantire una richiesta di coppia più "morbida" alla macchina elettrica e più attinente alla realtà.

Negli stati 1, 2 e 3 (rispettivamente di frizione in apertura, aperta ed in chiusura) approssimeremo il comportamento della frizione come se invece fosse completamente aperta. La coppia fornita dal motore in tale situazione è nulla e dunque la macchina elettrica sarà costretta a coprire richieste di coppia istantanee e non graduali, con la possibile nascita di problemi sulle correnti e sul LiC.

In ottica futura e per garantire una migliore simulazione del comportamento delle componenti elettriche, si ritiene necessaria la corretta modellazione della frizione. Lo scopo dell'attività della macchina elettrica si concentra infatti nel breve tempo in cui avviene la cambiata, dove i transitori di cui si è discusso assumono particolare rilevanza.

7.3 Sviluppi Futuri

In ottica futura si ritiene che possa essere interessante un approfondimento di:

- CDS (Cylinder Deactivation System).
- Frizione.
- Modellazione termica dell'olio del cambio.
- Start/Stop.
- Modelli elettrici.

L'approfondimento può essere effettuato a diversi livelli di dettaglio a seconda delle necessità, pagando un prezzo in termini di velocità di calcolo e complessità del modello.

8 Simulazioni Veicolo

Il modello di partenza è stato dunque modificato, permettendoci di simulare il comportamento di una Lamborghini Aventador. In particolare, andranno valutati i contributi dati dalla disattivazione dei cilindri oltre che dall'introduzione dei dati sperimentali relativi al cambio.

Ovviamente bisognerà analizzare anche il comportamento delle componenti elettriche, verificandone il contributo sulla coppia erogata in fase di cambiata.

A meno di diverse specifiche i grafici riportati si riferiscono ad una simulazione sul ciclo NEDC effettuata con il modello completo dotato di cambio aggiornato, CDS e componenti elettriche e filtro attivo. Si è deciso innanzitutto di procedere senza effettuare modifiche sulla strategia.

Ricordiamo che il New European Driving Cycle [33] è un ciclo di guida comunemente adottato in Europa per conoscere i consumi di combustibile di autoveicoli commerciali leggeri.

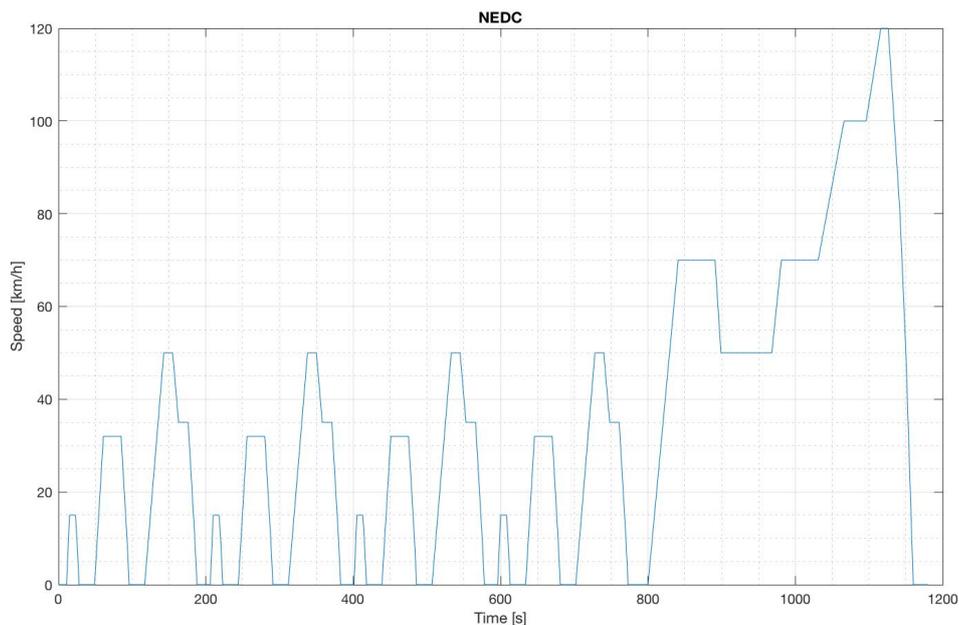


Fig.55: NEDC.

8.1 Cambio

Per quanto riguarda il cambio, il modello è stato modificato per adattarsi alle misure sperimentali delle forze perse e non fa più riferimento alla formulazione del rendimento proposta da Genta [34].

Facendo riferimento ad un ciclo NEDC, per il quale abbiamo misurato le temperature dell'olio del cambio, confrontiamo i risultati ottenuti. Di seguito le efficienze nel modello originale:

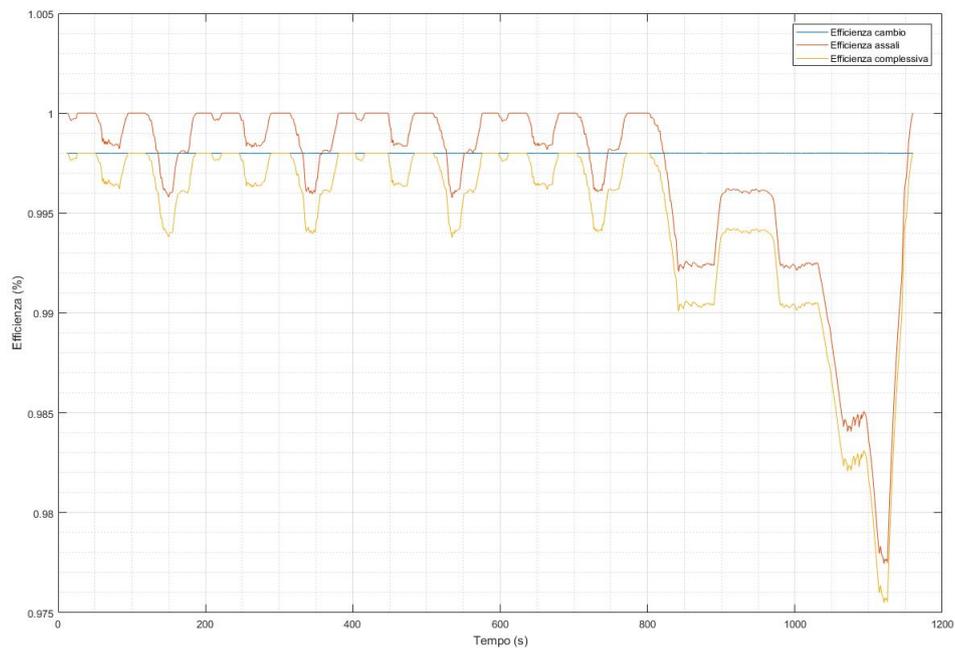


Fig.56: Transmission efficiency.

Come si può notare l'efficienza del cambio è molto vicina all'unità, simulando un comportamento quasi ideale.

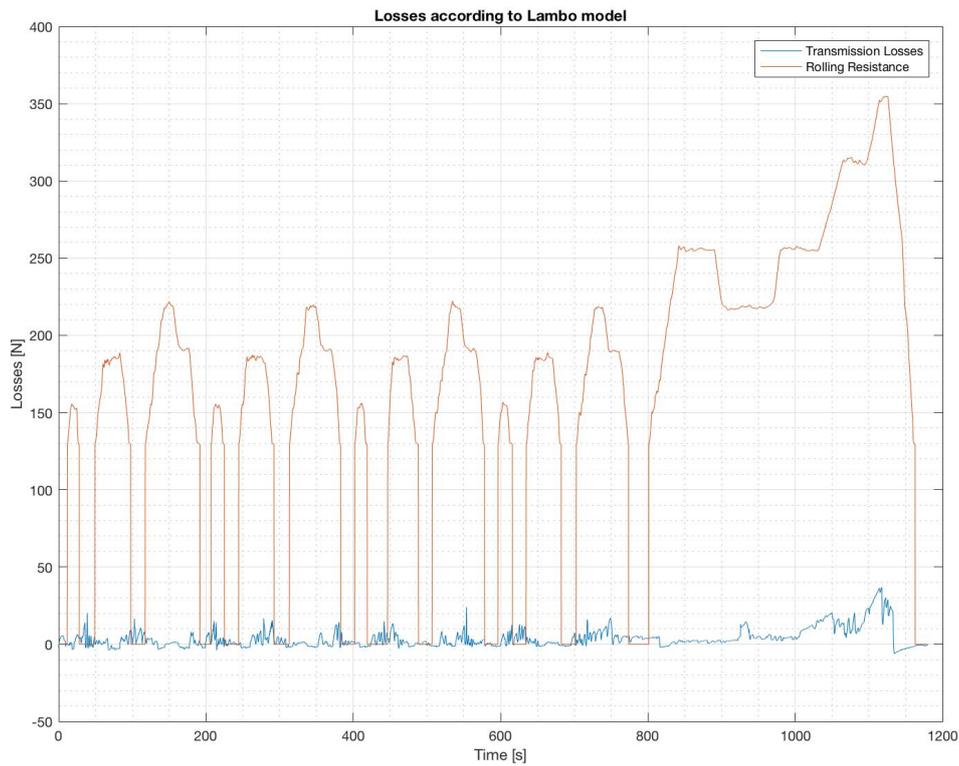


Fig.57: Rolling resistance.

Queste le forze resistenti simulate nel modello Lambo per una vettura Murcielago.

Di seguito andiamo invece a svolgere la simulazione per una vettura Aventador il cui cambio si basi sulle misure sperimentali svolte. Ipotizziamo inoltre di lavorare con la disattivazione dei cilindri e con la macchina elettrica funzionante. Queste le forze perse per rotolamento:

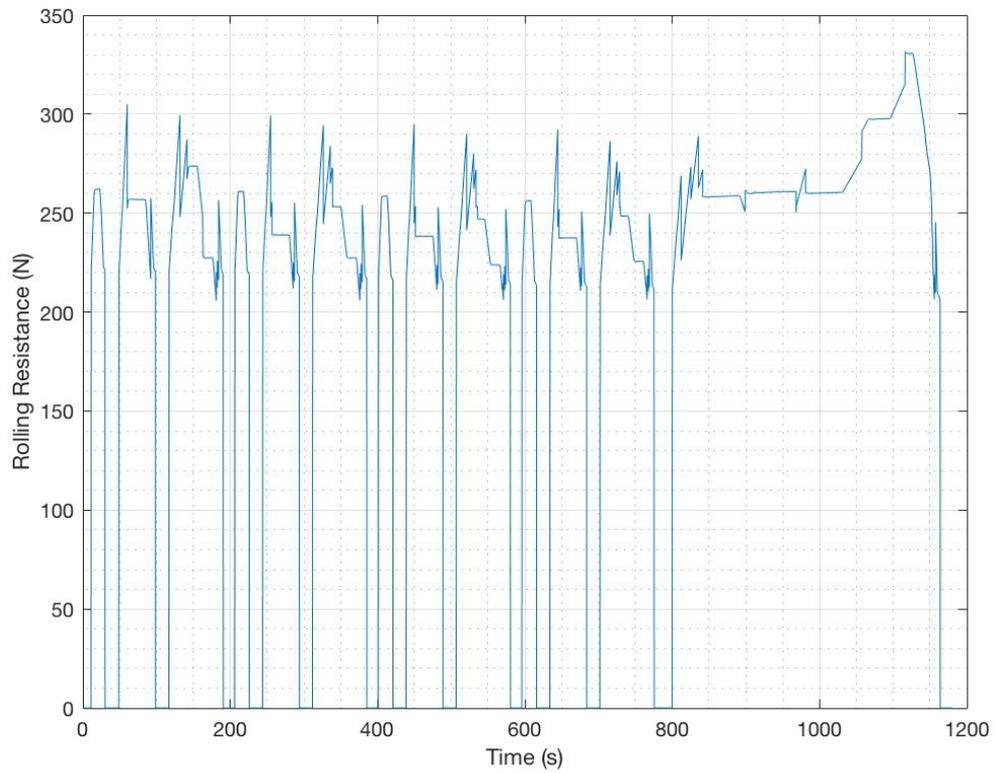


Fig.58: Experimental losses.

Le forze resistenti ottenute sono leggermente maggiori di quelle individuate nel modello originale, che si basava sulle ipotesi di Genta [34] e Wong [35].

8.2 Componenti Elettriche

La simulazione delle componenti elettriche prevede l'individuazione di una richiesta di coppia da parte del blocco di strategia. Come anticipato nel paragrafo 7.2, il comportamento della richiesta dipende fortemente dalla modellazione della frizione.

La macchina elettrica è infatti chiamata a fornire coppia non appena viene segnalato il cambio marcia. Difatti, in tale condizione, la coppia alle ruote proveniente dal motore è nulla.

A fronte della richiesta di coppia viene individuata la corrente circolante nel LiC, che ne provoca la scarica.

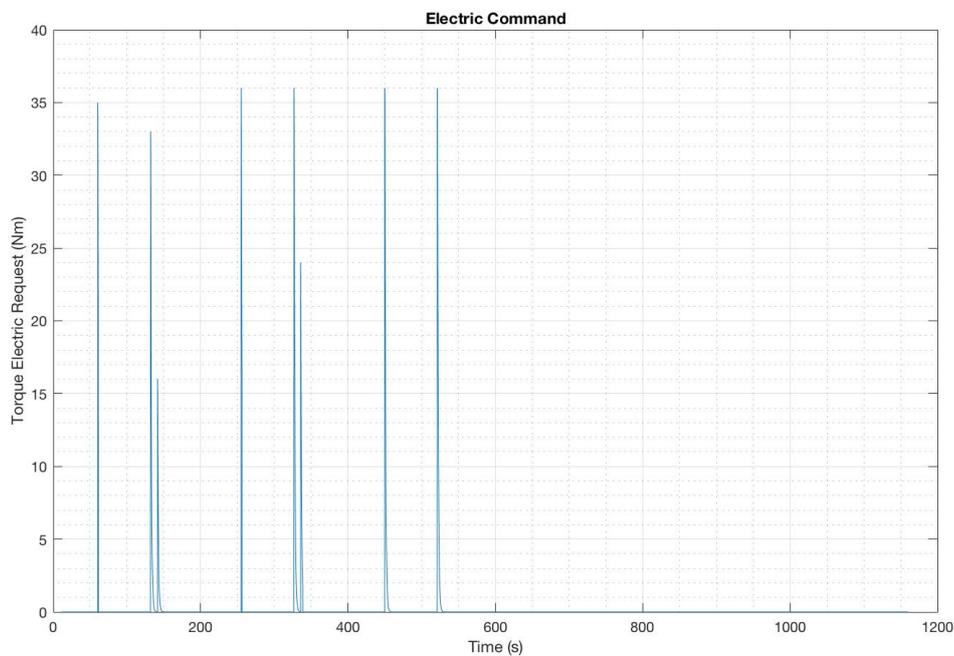


Fig.59: Electric command from strategy.

Osservando il dettaglio del comando elettrico possiamo evidenziare in maniera chiara le caratteristiche della richiesta di coppia.

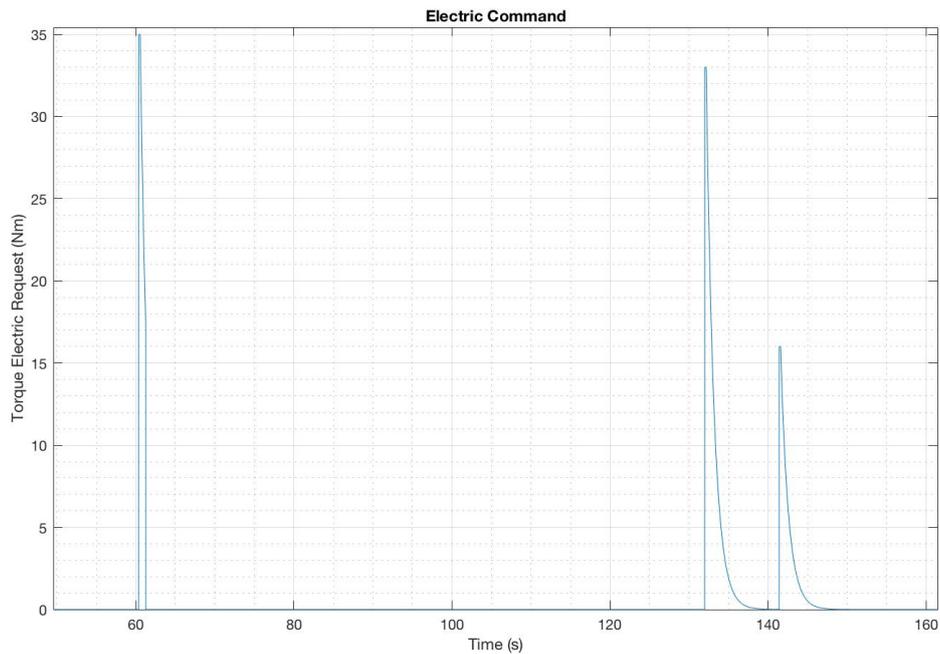


Fig.60: Torque request detail.

Dal dettaglio della richiesta di coppia si individuano una serie di picchi che rispettano le attese, sono caratterizzati infatti da una rapida crescita e da brevi tempi di erogazione della coppia (pari agli 0,2 s stimati per la cambiata).

Di più difficile analisi sono le “code” del comando elettrico, determinate a livello di strategia e dovute al filtro di saturazione presente in uscita.

Noto il comando elettrico e la tensione iniziale del LiC, otterremo i seguenti valori di corrente:

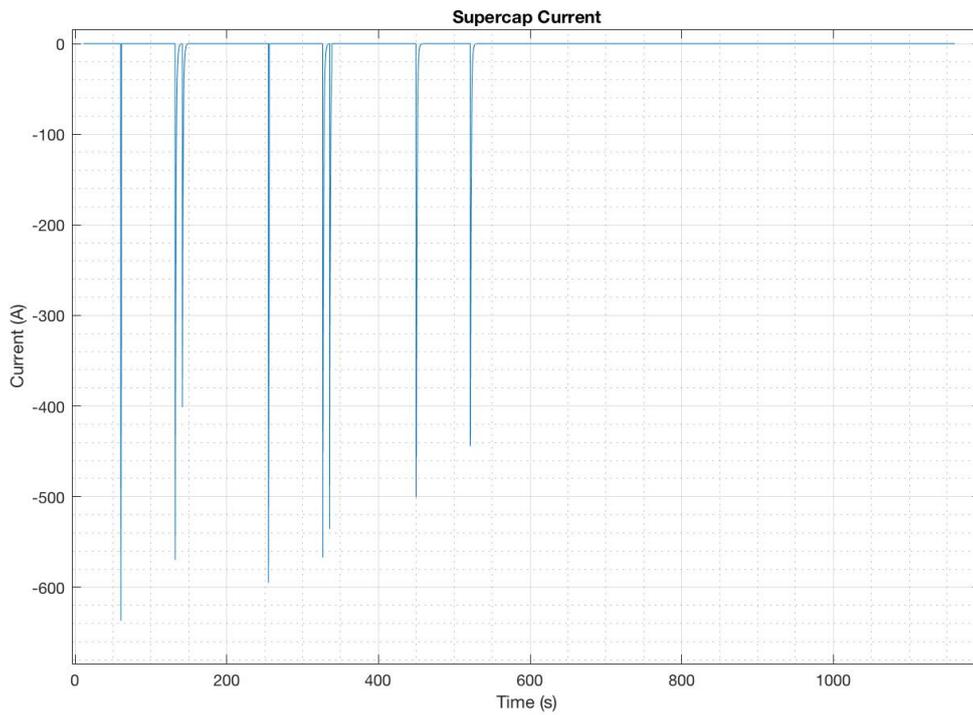


Fig.61: Current.

L'andamento della corrente riflette quello del comando elettrico, con le stesse crescite repentine e i successivi smorzamenti.

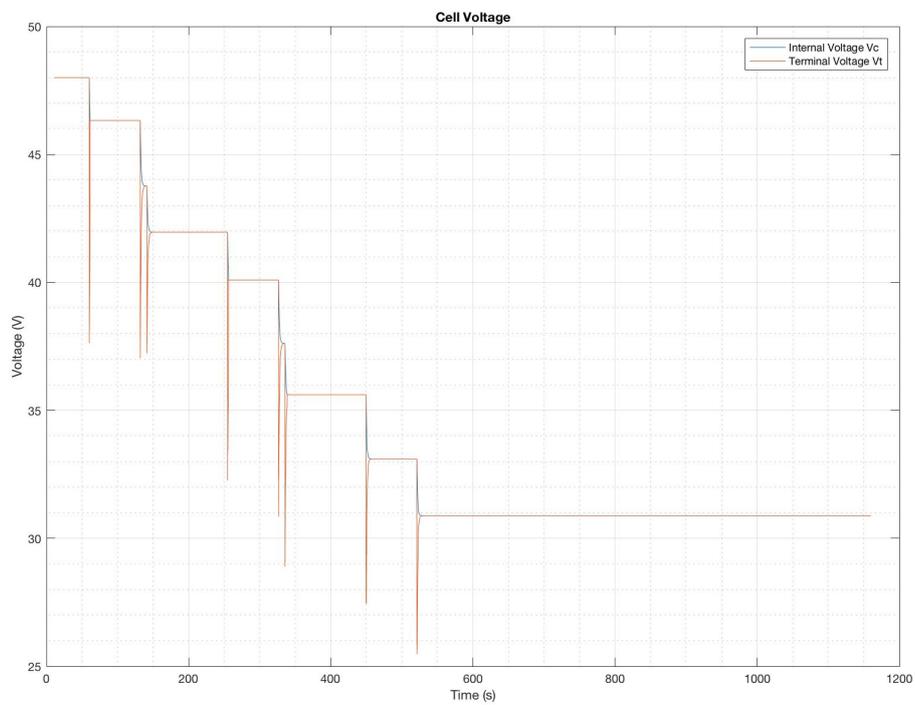


Fig.62: LiC voltage.

Questa la tensione individuata nel LiC, che si scarica progressivamente fino ad arrivare al limite imposto.

La tensione interna del LiC presenta un andamento coerente con il processo di scarica, mentre la tensione ai terminali è caratterizzata da oscillazioni significative. Queste oscillazioni nascono poiché nel modello adottato è presente una resistenza interna che provoca una caduta di tensione, il cui andamento riproduce quello della corrente.

Si ritiene che un modello aggiornato di frizione potrebbe dare innanzitutto delle richieste di coppia più graduali, a cui si associano simili andamenti della corrente. La tensione ai terminali continuerebbe a presentare dunque delle oscillazioni, di entità però probabilmente ridotta rispetto a quanto visto finora.

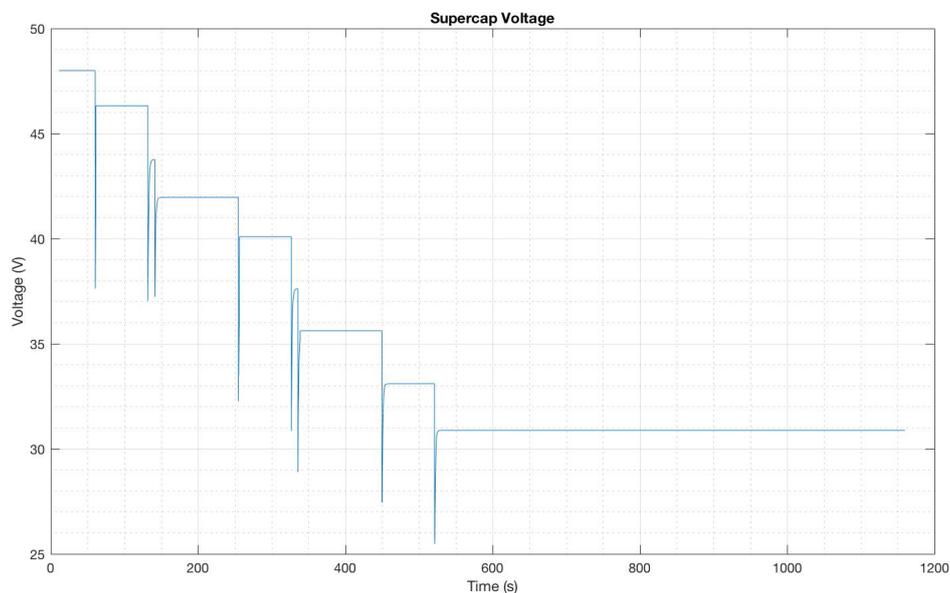


Fig.63: Terminal voltage.

Sono state svolte alcune prove su strada della vettura, osservando nel dettaglio il comportamento del LiC. Nel corso di queste prove si è riscontrato il fenomeno simulato, con cadute di tensione di 7-8 Volt, recuperate non appena la corrente si annullava.

È necessario tenere conto di queste caratteristiche, soprattutto in relazione ai limiti di protezione dei componenti, dal momento che potrebbero influenzare in maniera significativa il campo di funzionamento.

A tal proposito bisogna considerare che al momento è assente in strategia un limite sulle correnti. Si potrebbe pensare di formulare tale limite basandosi su

vari aspetti, tra cui le caratteristiche dei componenti in gioco, la potenza dissipata ed anche la caduta di tensione appena analizzata.

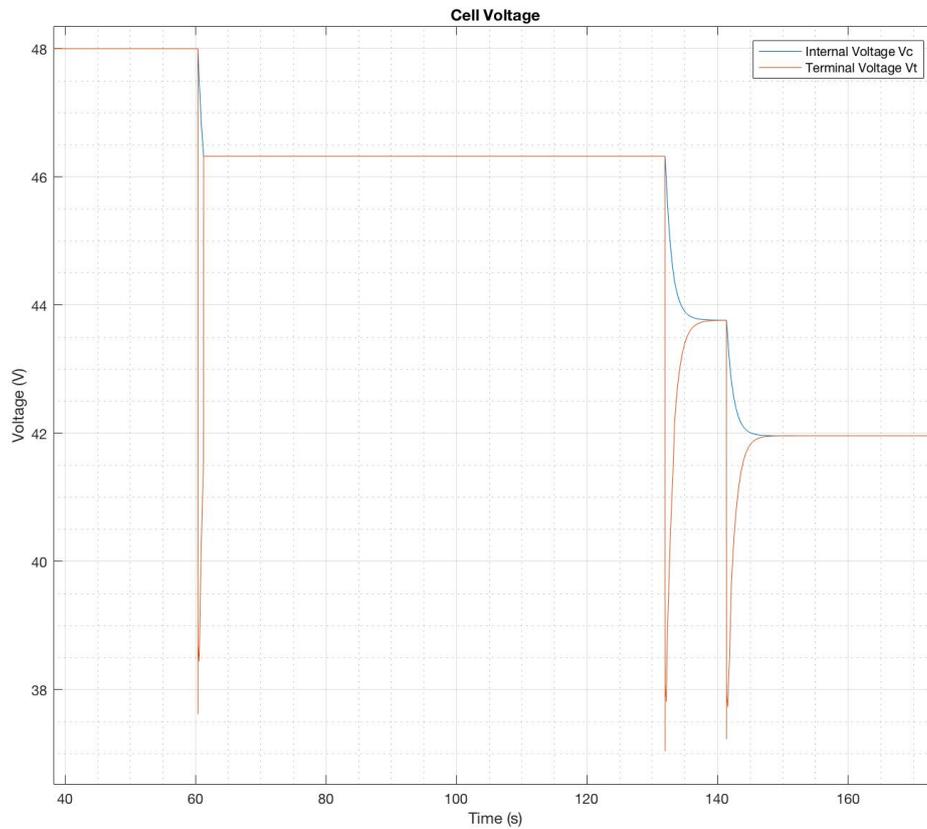


Fig.64: LiC voltage detail.

Successivamente abbiamo svolto alcune simulazioni eliminando l'intervento del filtro, ne risulta un comando elettrico leggermente differente ed un diverso comportamento del LiC che si scarica molto più lentamente.

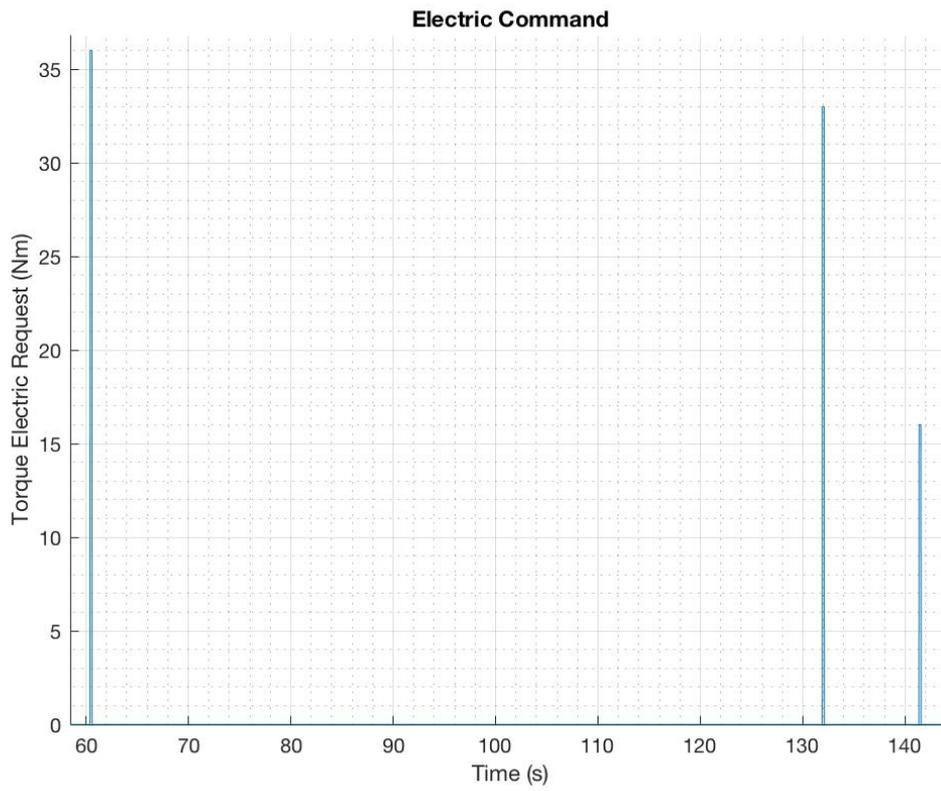


Fig.65: Electric command with filter off.

In assenza del filtro, il comando elettrico si esaurisce negli 0,2 s di cambiata, senza code di smorzamento. La tensione che ne consegue:

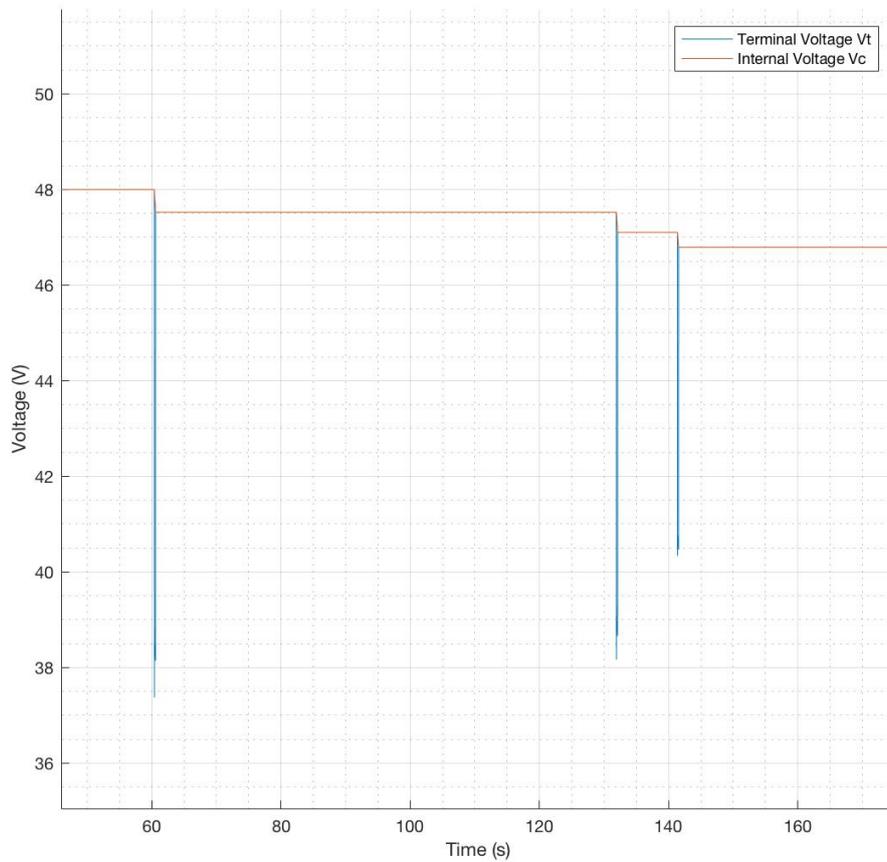


Fig.66: LiC voltage with filter off.

L'entità delle oscillazioni continua ad essere significativa, a causa delle elevate correnti, ma l'assenza degli smorzamenti fa sì che tali oscillazioni si esauriscano negli 0,2 s di cambiata, come il comando elettrico.

8.3 CDS (Cylinder Deactivation System)

Il contributo del sistema CDS, secondo le ipotesi fatte, è evidente nella parte di ciclo extra urbana dove la cilindrata del motore varierà tra il suo attuale valore e la metà dello stesso.

Al dimezzarsi della cilindrata si riducono i consumi e la pme raddoppia.

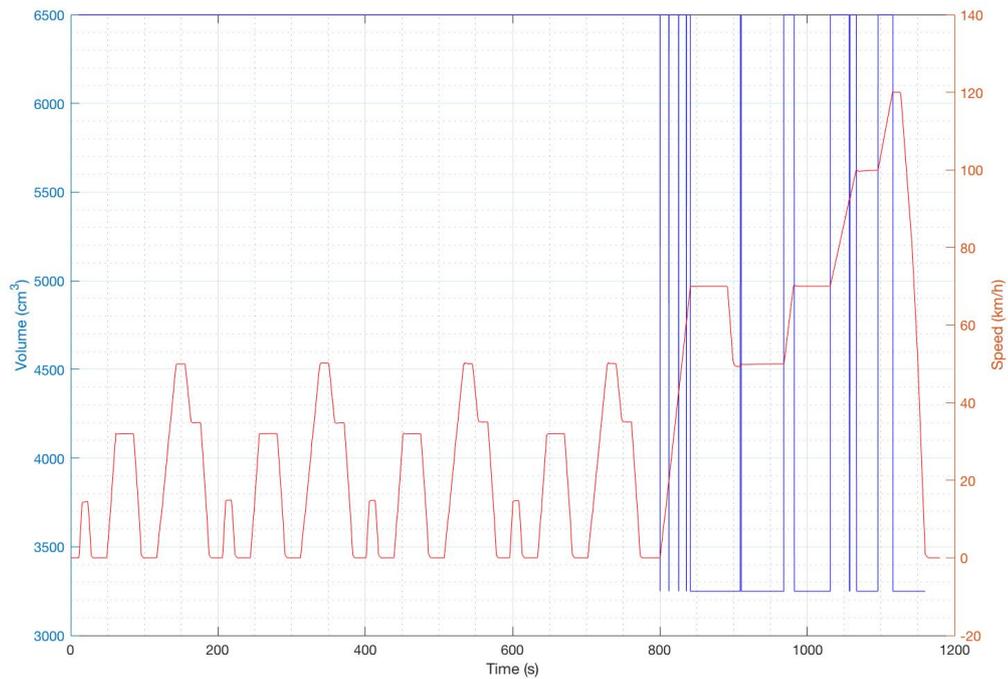


Fig.67: Vehicle displacement and speed.

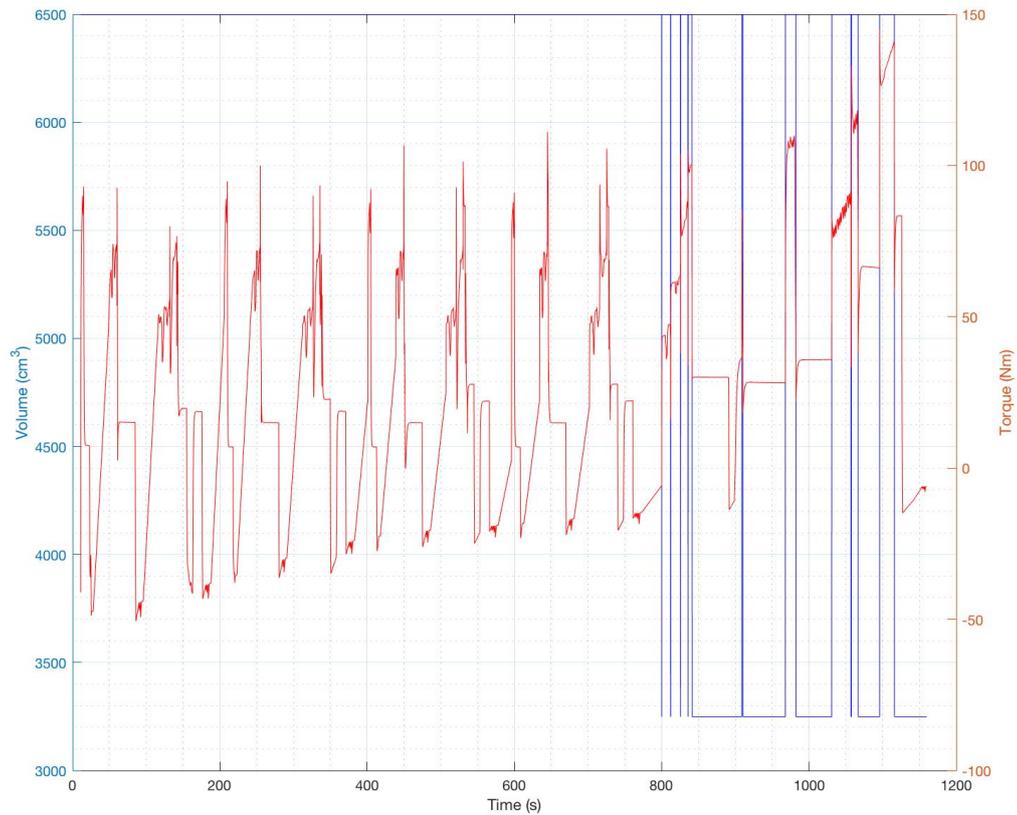


Fig.68: Vehicle displacement and engine torque.

Il funzionamento del sistema di disattivazione dei cilindri non è perfetto, infatti sono evidenti le oscillazioni della cilindrata nei tratti in cui la vettura accelera. Tali oscillazioni sono però di breve durata e non alterano i risultati della simulazione.

8.4 Cambiata Elettrica

Riportiamo ora i risultati del ciclo NEDC e visualizziamo la fase della cambiata nel dettaglio.

Individuiamo in particolare l'andamento della coppia meccanica ed elettrica erogata nel corso della simulazione, analizzando più nel dettaglio la fase di cambio marcia, dove il motore elettrico viene attivato.

La coppia totale è data dalla somma di coppia meccanica ed elettrica, ci si aspetta una coppia elettrica nulla nel corso del normale funzionamento della vettura e diversa da zero solamente nelle fasi di cambiata.

Come mostrato precedentemente però, questa condizione non si verifica ed il comando uscente dalla strategia si mantiene non nullo per un tempo maggiore della cambiata, ciò si ripercuote sulla coppia totale, anche se per brevi periodi.

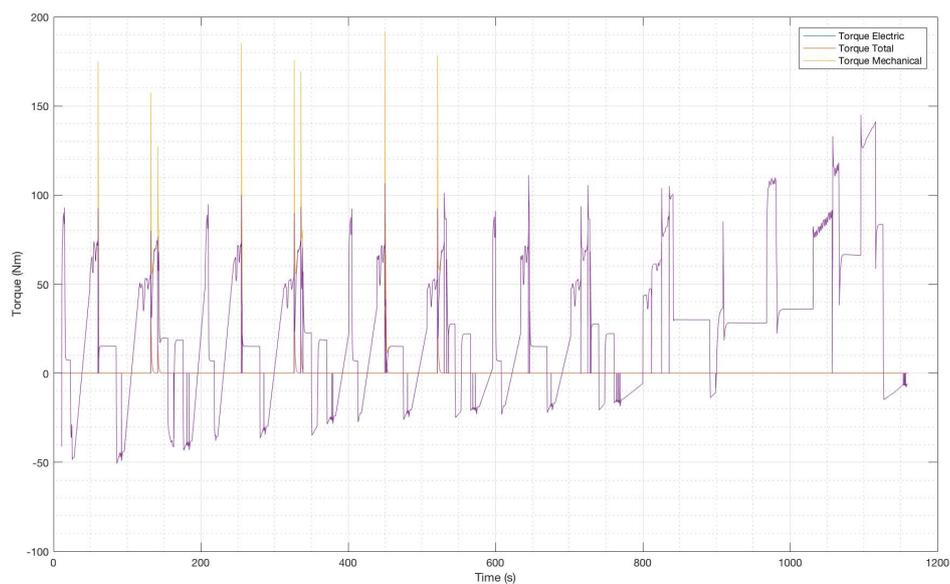


Fig.69: NEDC torque.

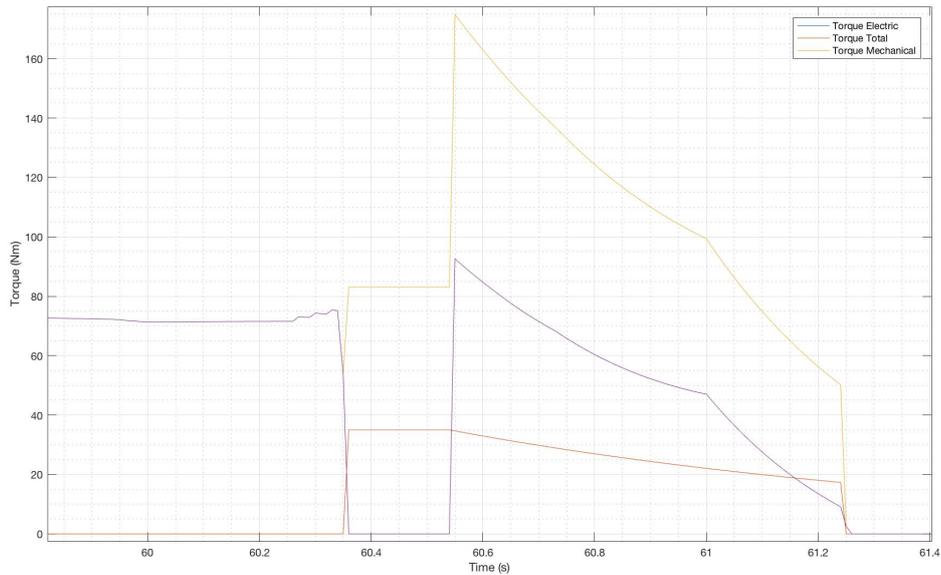


Fig.70: Gear change detail.

Come mostrato nel diagramma di dettaglio, è evidente che all'apertura della frizione corrisponde un annullamento della coppia meccanica.

In corrispondenza di tale annullamento, la coppia elettrica cresce fino al valore imposto dalla strategia (raggiunge il suo massimo di coppia erogabile) e permette di avere una coppia totale alle ruote che si mantiene sui valori desiderati. Con lo spegnimento del filtro invece la coppia totale si mantiene pressoché costante:

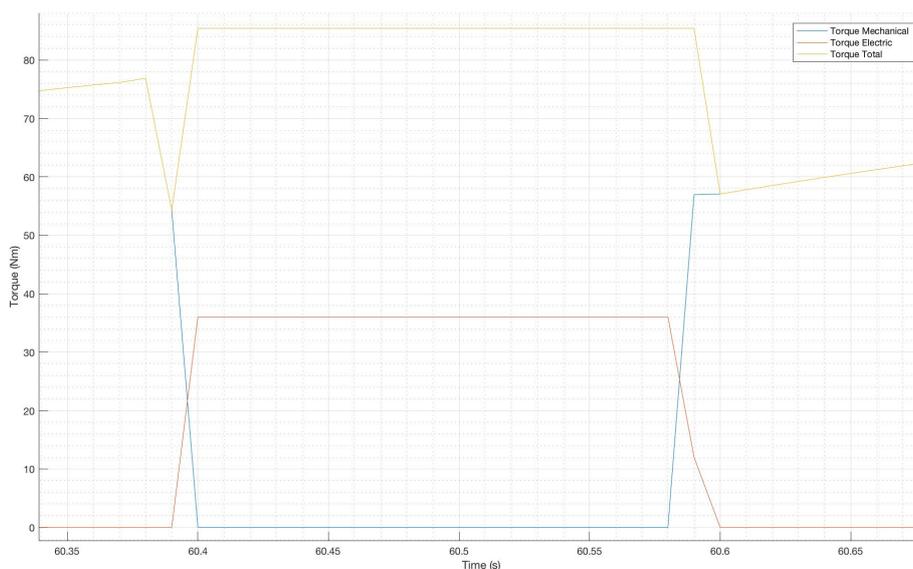


Fig.71: Gear change detail with filter off.

Di seguito la mappa che mostra i punti di funzionamento toccati dalla vettura, l'attivazione dello Start/Stop porta ad annullamento la velocità di rotazione dell'albero motore.

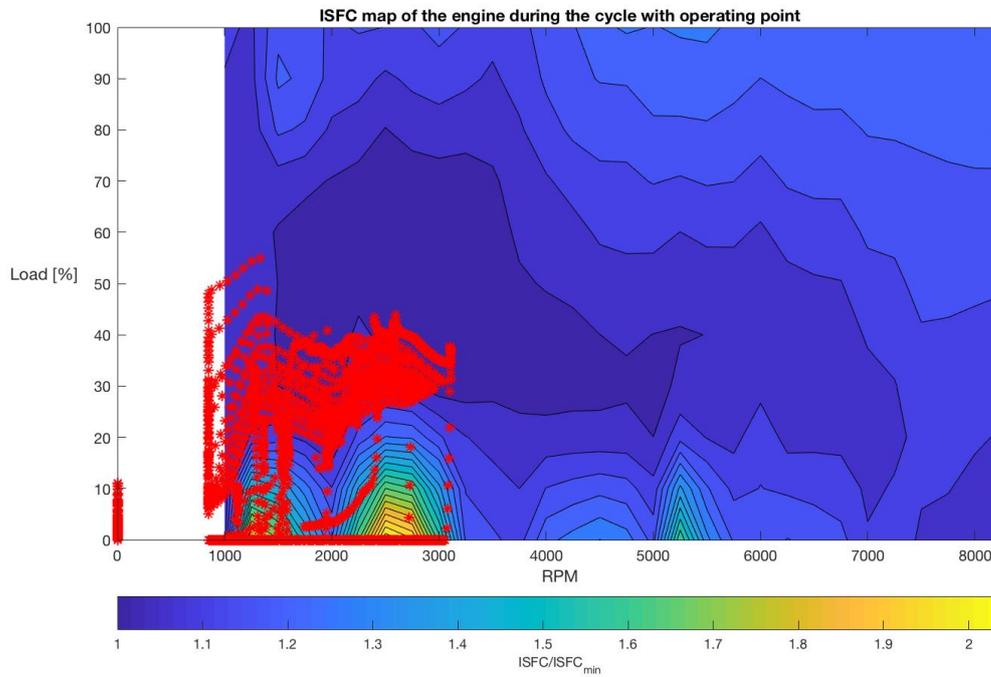


Fig.72: Operating point map.

8.5 Test Demo

Di seguito si riportano alcuni dettagli dei test svolti su strada con il dimostratore.

Il diagramma seguente mostra il contributo della cambiata sulle velocità, l'effetto ottenuto grazie alla coppia generata dalla macchina elettrica è particolarmente evidente e porta la vettura ad accelerare in fase di cambiata. Modificando la strategia potremo modificare e, nel caso, limitare questa rapida crescita di velocità.

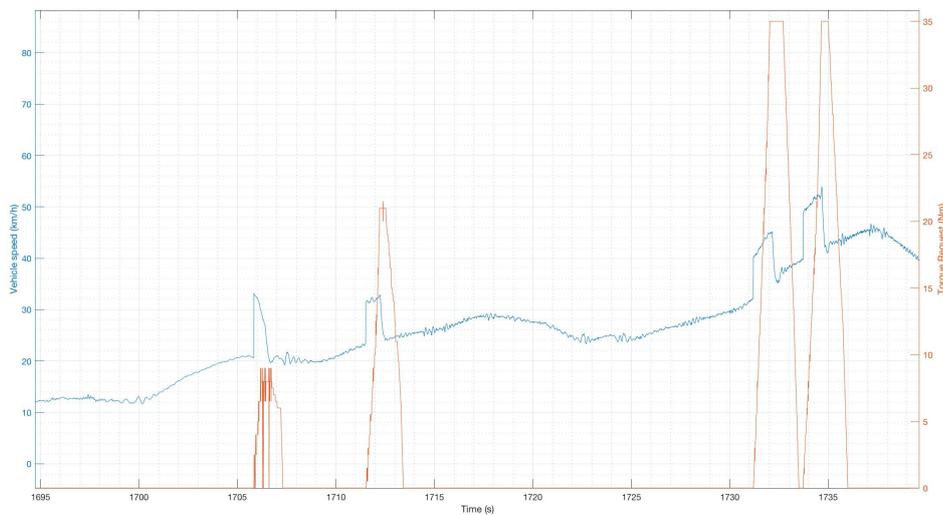


Fig.73: Measured speed and torque request.

Di seguito la tensione ai terminali del LiC e la richiesta di coppia alla macchina elettrica. In corrispondenza delle cambiate si nota come la tensione del LiC cali molto rapidamente, anche di 7-8 V, per poi tornare ad un valore stabile. L'effetto che si nota è lo stesso simulato dal modello, infatti, a fronte di elevate correnti, la perdita di tensione associata alla resistenza interna diventa particolarmente rilevante, per poi annullarsi a correnti nulle.

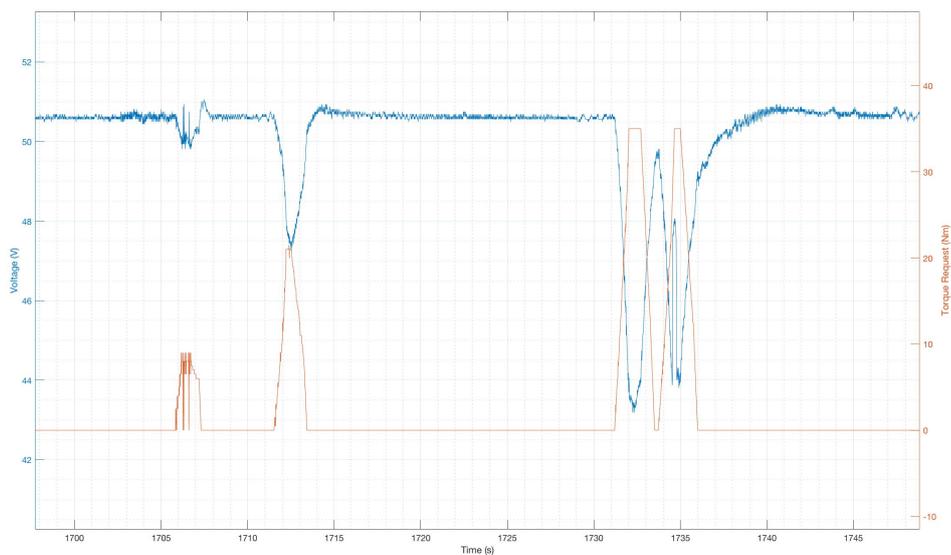


Fig.74: Measured voltage and torque request.

In occasione di ogni cambiata la tensione ritorna poi ai 51V impostati in strategia grazie alla ricarica garantita da DC/DC converter ed alternatore, il cui comportamento non viene simulato nel nostro modello.

8.6 Emissioni

Confrontiamo ora le emissioni ottenute attraverso diverse simulazioni:

- A. Modello Murcielago con dati aggiornati.
- B. Modello Aventador con dati aggiornati, introduzione di cambio e CDS.
- C. Modello Aventador con dati aggiornati, introduzione di cambio, CDS e parte elettrica a filtro spento.
- D. Modello Murcielago con dati aggiornati, introduzione di CDS.

Le simulazioni vengono confrontate con i dati misurati pubblicati dalla stampa specializzata e con i dati misurati su una vettura di prova Lamborghini. Questi valori utilizzati come confronto sono leggermente differenti tra loro poiché la vettura analizzata è stata sottoposta a modifiche e non rappresenta dunque un caso esemplare ma ci permette di fare riferimento a informazioni rilevate internamente a Lamborghini.

Il confronto viene effettuato con simulazioni senza filtro poiché dall'osservazione dei dati reali si può certificare la corrispondenza del modello con la realtà.

NEDC (L/100km)	Test Urban	Extra-Urban (*)	Combined (*)
Reality	27,3	11,6	17,2
Model A	26,8	14,9	19,4
Consumption (g)	795,4	775,6	1571
Error Real vs A (%)	1,8	28,7	12,8

Table 9: Model A NEDC simulation. [37]

NEDC (L/100km)	Test Urban	Extra-Urban (*)	Combined (*)
Reality	26,2	11,6	16,9
Model A	26,8	14,9	19,4
Consumption (g)	795,4	775,6	1571
Error Real vs A (%)	2,3	28,7	14,8

Table 10: Model A NEDC simulation (VIN).

NEDC (L/100km)	Test	Urban	Extra-Urban	Combined
Reality		27,3	11,6	17,2
Model B		27,1	12,2	17,8
Consumption (g)		804,2	635,8	1440
Error Real vs B (%)		0,7	5,5	3,5

Table 11: Model B NEDC simulation. [37]

NEDC (L/100km)	Test	Urban	Extra-Urban	Combined
Reality		26,2	11,6	16,9
Model B		27,1	12,2	17,8
Consumption (g)		804,2	635,8	1440
Error Real vs B (%)		3,4	5,5	5,3

Table 12: Model B NEDC simulation (VIN).

In entrambi i casi i risultati ottenuti nel corso della Urban Part riflettono i risultati reali in modo affidabile (con errori inferiori al 5%). L'errore associato alla Extra-Urban Part è invece maggiore (comunque inferiore al 10%) e probabilmente provocato da una modellazione non perfetta del sistema CDS.

Abbiamo infatti mostrato come il modello realizzato possa garantire un accettabile funzionamento della vettura, ma allo stesso tempo, basandosi unicamente sul dimezzamento della cilindrata, non è in grado di illustrare correttamente il fenomeno.

NEDC (L/100km)	Test	Urban (**)	Extra-Urban (**)	Combined (**)
Reality		27,3	11,6	17,2
Model C		27,1	12,3	17,8
Consumption (g)		801,9	638,1	1440
Error Real vs C (%)		0,7	5,9	3,5

Table 13: Model C NEDC simulation. [37]

NEDC (L/100km)	Test	Urban (**)	Extra-Urban (**)	Combined (**)
Reality		26,2	11,6	16,9
Model C		27,1	12,3	17,8
Consumption (g)		801,9	638,1	1440
Error Real vs C (%)		3,4	5,9	5,3

Table 14: Model C NEDC simulation (VIN).

NEDC (L/100km)	Test	Urban	Extra-Urban	Combined
Reality		27,3	11,6	17,2
Model D		26,8	12,7	18,0
Consumption (g)		795,4	661,6	1457
Error Real vs D (%)		1,8	9,8	4,7

Table 15: Model D NEDC simulation. [37]

NEDC (L/100km)	Test	Urban	Extra-Urban	Combined
Reality		26,2	11,6	16,9
Model D		26,8	12,7	18,0
Consumption (g)		795,4	661,6	1457
Error Real vs D (%)		2,3	9,8	6,5

Table 16: Model D NEDC simulation (VIN).

(*) Il modello Murcielago non presenta la disattivazione dei cilindri, di conseguenza i consumi ottenuti in queste fasi non riflettono il comportamento reale.

(**) Il modello Aventador completo introduce il contributo della macchina elettrica oltre ad un modello CDS, pertanto differirà dai valori misurati. In particolare, per via della strategia adottata, il contributo del motore elettrico non inciderà significativamente sui consumi.

9 Conclusioni

La modellazione del veicolo rappresenta una sfida complicata, dove la difficoltà principale è costituita dal raggiungimento di un equilibrio tra la velocità di calcolo e l'accuratezza dei risultati. L'obiettivo alla base dell'attività di modellazione è quello di realizzare un software capace di garantire velocemente risultati affidabili a fronte della minore quantità di input possibile.

Nel nostro caso, l'obiettivo principale era quello di simulare la cambiata elettrica, integrando la strategia Lamborghini e mantenendo i valori simulati delle emissioni coerenti con i risultati reali misurati. La macchina elettrica è dunque adibita principalmente alla copertura di una lacuna di comfort.

Osservando i risultati della simulazione, possiamo affermare che il modello si mantiene affidabile anche a fronte delle modifiche effettuate, in particolare potrebbe produrre risultati più accurati nel caso in cui si decidesse di proseguire lo sviluppo lavorando innanzitutto sulla modellazione della frizione e del sistema di disattivazione dei cilindri.

Per quanto riguarda il LiC, abbiamo rilevato oscillazioni significative nella tensione ai terminali, dovute alla resistenza interna e alla corrente circolante. È possibile che queste oscillazioni generino problemi legati al campo di funzionamento, pertanto andrebbero limitate intervenendo sulle correnti o sulla resistenza equivalente. Una strada che andrebbe approfondita è, ad esempio, quella di inserire una serie di condensatori in parallelo a quelli già installati.

Confrontando i risultati dei cicli NEDC per B e D (8.5), ci accorgiamo che il modello che segue la formulazione di Wong [35] può produrre risultati simili a quelli sperimentali. Questo è dovuto al fatto che la formula di Wong [35] si basa comunque su dati sperimentali di coast-down e non si basa su un processo di interpolazione ed estrapolazione lineare.

Infatti, il forte limite della nostra prova di caratterizzazione del cambio è rappresentato dal fatto che i valori misurati sono stati determinati in condizioni molto instabili (la temperatura dell'olio del cambio variava velocemente nel corso della prova) e sono stati oggetto di un'operazione di interpolazione lineare al fine di garantire semplicità e velocità di calcolo. Ciononostante, possiamo ritenere che le misure siano affidabili, il che è evidente anche nei risultati delle simulazioni svolte.

Per quanto riguarda la cambiata elettrica, si rileva un particolare associato al comando generato dalla strategia. Difatti, al momento della chiusura della frizione, il comando elettrico si smorza progressivamente facendo sì che la

coppia risultante alle ruote risulti maggiore del valore desiderato, seppure per tempi brevi. Questo fenomeno nasce per la presenza di un filtro in uscita al comando di coppia e può essere eliminato intervenendo sul filtro stesso.

Si ritiene che la mancanza della corretta modellazione dei transitori della frizione contribuisca al particolare andamento del valore del comando elettrico. A fronte di una repentina riduzione del comando, il filtro presente in strategia ne forza la diminuzione graduale.

Il fenomeno di smorzamento genera correnti non nulle per tempi significativi, la scarica del LiC è quindi molto rapida e si esaurisce già nella fase urbana. Le simulazioni senza filtro assicurano invece una scarica più lenta, grazie alla quale il LiC riesce a coprire tutte le cambiate del ciclo.

Si è verificato, confrontando con i risultati reali, che la disattivazione del filtro è in linea con il comportamento della vettura.

La ricarica del LiC non viene simulata nel modello illustrato, poiché non sono state modellate le componenti adibite a questa funzione, quali DC/DC converter ed alternatore presenti in vettura. Stiamo assumendo che il LiC inizialmente carico possa solamente scaricarsi e non abbia altre funzioni.

In ottica futura, si ritiene che la modellazione dei transitori di apertura e chiusura della frizione e la modellazione del sistema di disattivazione dei cilindri possano contribuire significativamente alla corretta simulazione del comportamento della vettura. Pertanto questi potrebbero essere considerati come i passaggi successivi dell'attività.

In secondo luogo, si potrebbe approfondire il funzionamento del comando di Start/Stop, che è attivo nel corso del funzionamento della vettura e che assume grande importanza nei cicli di emissioni.

Un'ulteriore attività potrebbe essere rappresentata dalla modellazione degli pneumatici. Il loro comportamento, infatti, non ha grande importanza nei cicli di emissioni svolti a banco, ma assume una rilevanza molto maggiore in situazioni di elevata accelerazione. Un chiaro esempio è rappresentato dai test di accelerazione, in particolare nelle prime fasi, tanto da definire le prestazioni della vettura.

Dal momento che le informazioni ottenute da questi test contraddistinguono una vettura Lamborghini, desideriamo simularne correttamente i risultati.

10 Lista delle Tabelle e delle Immagini

10.1 Lista delle Tabelle

Table 1: Hybrid classification.

Table 2: C-rate and service times when charging and discharging batteries of 1Ah (1,000mAh).

Table 3: Results analysis NEDC.

Table 4: analysis FTP-75.

Table 5: Results analysis WLTP.

Table 6: Results analysis acceleration test.

Table 7: LiC tests.

Table 8: Operating points.

Table 9: Model A NEDC simulation. [37]

Table 10: Model A NEDC simulation (VIN).

Table 11: Model B NEDC simulation. [37]

Table 12: Model B NEDC simulation (VIN).

Table 13: Model C NEDC simulation. [37]

Table 14: Model C NEDC simulation (VIN).

Table 15: Model D NEDC simulation. [37]

Table 16: Model D NEDC simulation (VIN).

10.2 Lista delle Immagini

Fig.1: NASA key findings.

Fig.2: Contributors to the carbon production.

Fig.3: Total carbon production.

Fig.4: Per capita carbon emissions.

Fig.5: Carbon dioxide emissions for the top 40 countries by total emissions in 2013, given as totals and per capita. [4]

Fig.6: The cumulative CO₂ emissions between 1970 and 2013 from the top 40 countries in the world, including some extra-national bodies. The data comes from the EU EDGAR database. [4]

Fig.7: Temperature anomaly during years. [6]

Fig.8: Climate differences between 1961-1990.

Fig.9: Greenhouse gas emissions. [7]

Fig.10: Emissions from transportation.

Fig.11: Parallel hybrid scheme.

Fig.12: Series hybrid scheme

Fig.13: Combined hybrid scheme (power-split).

Fig.14: Honda Integrated Motor Assist. [12]

Fig.15: Mercedes S-Class. [13]

Fig.16: Battery scheme.

Fig.17: Double-layer capacitor scheme.

Fig.18: Pseudocapacitor scheme.

Fig.19: Lamborghini Aventador Coupé.

Fig.20: Lamborghini demonstrator structure.

Fig.21: ALPHA Guest User Interface. [19]

Fig.22: ALPHA v 2.2 results.

Fig.23: The QSS Toolbox library.

Fig.24: ADVISOR Menu.

Fig.25: CO2MPAS GUI.

Fig.26: Forward looking scheme.

Fig.27: Lamborghini model.

Fig.28: LiC positioning.[26]

Fig.29: Life cycle performance (1).

Fig.30: Energy-Power positioning.

Fig.31: Life cycle performance (2).

Fig.32: LiC specifications.

Fig.33: LiC module specifications.

Fig.34: LiC model.

Fig.35: Current differences (1).

Fig.36: Current differences (2).

Fig.37: Permanent magnet motor.

Fig.38: Integrated system.

Fig.39: Electric motor.

Fig.40: LiC.

Fig.41: Complete model.

Fig.42: NEDC oil gearbox temperature.

Fig.43: NEDC oil temperature.

Fig.44: Power-(primary speed)².

Fig.45: Power-(primary speed)² at 60°C.

Fig.46: Power-(primary speed)² in 4th gear.

Fig.47: Power-(primary speed)² trend at same speed.

Fig.48: Power-(primary speed)³ trend at same speed.

Fig.49: Psecondary at 50°C.

Fig.50: k at 50°C.

Fig.51: Lambo model (1).

Fig.52: Lambo model (2).

Fig.53: Lambo model (3).

Fig.54: Experimental gearbox.

Fig.55: NEDC.

Fig.56: Transmission efficiency.

Fig.57: Rolling resistance.

Fig.58: Experimental losses.

Fig.59: Electric command from strategy.

Fig.60: Torque request detail.

Fig.61: Current.

Fig.62: LiC voltage.

Fig.63: Terminal voltage.

Fig.64: LiC voltage detail.

Fig.65: Electric command with filter off.

Fig.66: LiC voltage with filter off.

Fig.67: Vehicle displacement and speed.

Fig.68: Vehicle displacement and engine torque.

Fig.69: NEDC torque.

Fig.70: Gear change detail.

Fig.71: Gear change detail with filter off.

Fig.72: Operating point map.

Fig.73: Measured speed and torque request.

Fig.74: Measured voltage and torque request.

11 Appendice

11.1 Appendice A: Codice MATLAB per i Dati di Input

```
%% Script loading all the data
% Alessandro Franceschi
% This script must be in the same folder as the LamboTesi.slx model
% All the Excel documents are the one provided by Lamborghini
following
% their own templates
% This script loads values from documents and create the friction
model
% of the engine, moreover it loads the necessary data for the electric
components.

clc
close all

%% PI controller
Ki = 0.01;
Kp = 0.2;

%% Dimensions
g = 9.81; % [m/s^2]
Mass = xlsread('Aventador_Chassis_Data.xlsx',1,'C18'); % [kg]
l = xlsread('Aventador_Chassis_Data.xlsx',1,'C7')/1000; % Wheelbase
[m]
b = xlsread('Aventador_Chassis_Data.xlsx',1,'C11')/1000; % Distance
btw front wheel center and the CG [m]
c = l-b; % Distance btw rear wheel center and the CG [m]

rad = xlsread('Aventador_Wheels_Data.xlsx',1,'E5')*25.4/1000/2; %
Unloaded wheel radius inches to [mm]
% Radius coefficients  $Re = rad*f_0 + f_1*V + f_2*V^2$  (V in m/s) for
effective
% radius
k0 = 0.9845;
k1 = 3.9409e-06;
k2 = 7.7174e-08;

h = xlsread('Aventador_Chassis_Data.xlsx',1,'C9')/1000; % height of
the CG [m]
ha = xlsread('Aventador_Aerodynamics_Data.xlsx',1,'B15')/1000; %
Height of the application of the aero Force [m]
rho_fuel = xlsread('Aventador_Engine_Data.xlsx',2,'B4'); % [kg/L]

%% Inertia  $Me = (me_1 + me_2*i_{tot}^2)*Mass$ 
me1 = 1.04;
me2 = 0.0025;

%% Resisting Forces LB824_0_EU_K_Murcielago_Coupe_Aerodynamics_Data
% Drag
S = xlsread('Aventador_Aerodynamics_Data.xlsx',1,'D1'); % Frontal area
Cx = xlsread('Aventador_Aerodynamics_Data.xlsx',1,'J15');
```

```

% Lift
Czf = xlsread('Aventador_Aerodynamics_Data.xlsx',1,'J36'); % Front
lift
Czr = xlsread('Aventador_Aerodynamics_Data.xlsx',1,'J57'); % Rear
lift

% Rolling resistance Fr = (f0 + f1*V + f2*V^2)*Mass*g;
f0 = 0.0076;
f1 = 1e-04;
f2 = 0.8e-7;
rho = xlsread('Aventador_Engine_Data.xlsx',4,'B3'); % Air density

%% Engine
Engine_Torque = xlsread('Aventador_Engine_Data.xlsx',1,'C12:M50');
BSFC = xlsread('Aventador_Engine_Data.xlsx',3,'C52:M90');
Vd = xlsread('Aventador_Engine_Data.xlsx',1,'B4')./1e6; % From cm3 to
m3, Engine displacement
max_RPM = xlsread('Aventador_Engine_Data.xlsx',1,'B8'); % Rev limiter
thro = xlsread('Aventador_Engine_Data.xlsx',1,'C10:M10'); % Load from
0% to 100%
RPM = xlsread('Aventador_Engine_Data.xlsx',1,'B12:B50');
ind = find(RPM <= max_RPM); % Don't go further than the rev limiter
RPM = RPM(ind);
BSFC = BSFC(ind,:);

idle_RPM = xlsread('Aventador_Engine_Data.xlsx',1,'B7'); % Idle revs
%idle_RPM = 5800; % Lunch control in sport mode

BMEP = Engine_Torque.*2*2*pi/Vd; % Computation of the bmep in Pa
BMEP = [zeros(length(RPM),1) BMEP]; % At 0% load, the bmep = 0 because
the engine is just countering the fmep

% Oil temperature over time
time_oil = [0 200 400 600 800 1000 1200 1500 2000];
temp_oil = [23 37 63 76 90 95 97 98 98];
%temp_oil = [50 50 50 50 50 50 50 50 50]; %for the acceleration test
%temp_oil = [100 100 100 100 100 100 100 100 100];

% Oil 5W30 from
http://www.kewengineering.co.uk/Auto\_oils/oil\_viscosity\_explained.htm
temp_oil_v = [0 10 20 30 35 40 50 60 70 80 90
100];
visc_oil = [564 289 161 97 77 63 42 30 22 17 13
10];
nu_0 = visc_oil(end);

% Computation of the IMEP map
command = thro./100; % Intake pressure in terms of the throttle %age
pa = 101325; % Atmospheric pressure [Pa]
Pi = 0.1*pa + pa*command*0.8; % Intake manifold pressure, Hendrick and
Sorenson model
Nr = 2; % 4 stroke
a0 = 9.2209e+04 ; a1 = 6.6; a2 = 8.2276e-04; %mechanical losses
coefficients, according to Heywood, FMEPm
b0 = pa - Pi; b1 = 14.8889; b2 = -3.2909e-04; %coefficients for FMEPp,
pumping losses, Hendrick and Sorenson
FMEP = zeros(size(BMEP)); FMEP_P = FMEP; FMEP_M = FMEP;

```

```

ISFC = zeros(length(RPM),11);
[n1,n2] = size(ISFC);
IMEP = FMEP;
for i = 1:n1
    for j = 2:n2
        FMEP_M(i,j) = a0 + a1*RPM(i) + a2*RPM(i).^2;
        FMEP_P(i,j) = b0(j) + b1*RPM(i)*(Pi(j)/pa) +
b2*RPM(i).^2.*(Pi(j)/pa).^2;
        FMEP(i,j) = FMEP_M(i,j) + FMEP_P(i,j);
        IMEP(i,j) = BMEP(i,j) + FMEP(i,j);
    end
end

% At 0% load the IMEP = FMEP
FMEP_M(:,1) = a0 + a1.*RPM + a2.*RPM.^2;
FMEP_M(:,1) = b0(1) + b1*RPM(i)*(Pi(1)/pa) +
b2*RPM(i).^2.*(Pi(1)/pa).^2;
IMEP(:,1) = FMEP_M(:,1) + FMEP_M(:,1);

% Computation of the ISFC map
for i=1:n1
    for j=1:n2
        ISFC(i,j) = BSFC(i,j).*BMEP(i,j)./IMEP(i,j);
    end
end
ISFC =
interp1(linspace(10,100,9)',ISFC(:,3:end)','thro','linear','extrap');

%% Gearbox and Differential
% Aventador_Transmission: Torque loss
gearbox_temperature=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx', 3,
'B32:B34');
gearbox_speed=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx', 3,
'C31:F31');
gearbox_gear=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx', 3, 'H4:H8');

mm=length(gearbox_temperature);
nn=length(gearbox_speed);
zz=length(gearbox_gear);

gearbox_force_loss=zeros(mm,nn,zz);

%Different gear maps
for i=1:zz

gearbox_force_loss(:,:,i)=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx',
i+2, 'C32:F34');
end

PTO_EM_ratio=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx', 1, 'B28');

%Oil temperature profile
%time_oil_gear=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx', 8,
'A3:A179535');

```

```

%temp_oil_gear=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx', 8,
'B3:B179535');
%Estimated Oil temperature
time_oil_gear=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx', 8,
'F2:F13');
temp_oil_gear=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx', 8,
'G2:G13');

%% Transmission

Rear_Diff_Ratio=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx',1,'H20');
Central_Diff_Ratio=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx',1,'H19')
;
Front_Diff_Ratio=xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx',1,'H18');

transmission = xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx',1,'C5:C12');
ng = length(transmission);
GearRatio = transmission';
AddRatio = xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx',1,'H19');
%central
if isempty(AddRatio) ~= 0
    FinalRatio = xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx',1,'H20');
% Rear final ratio
else
    FinalRatio = xlsread('Aventador_Transmission_Data.xlsx',1,'H20');
% Rear final ratio
    FinalRatio = FinalRatio*AddRatio;
end

Fr = 0.7; % Proportion of Force going to the rear wheels
Ff = 1-Fr;
Rr = 0.3; % Proportion of the braking force on the rear wheels
Rf = 1-Rr;

shift = 0.2; % Shifting time in seconds for normal mode (0.2) and
sport mode (0.07)
%shift=0.07;

% Logic
StartGear = 1;
RPM_min = 1600; % Minimum rev we want to stay if throttle is 0-20%
RPM_max = max_RPM; % Max rev we want if throttle > 80%
low_limit = RPM_min*2*pi*rad./GearRatio(1:end-1)/FinalRatio/60*3.6;
%determines km/h low limit based on every gear ratio
high_limit = RPM_max*2*pi*rad./GearRatio(1:end-1)/FinalRatio/60*3.6;
Up_shift = [low_limit' 1.3*low_limit' 0.9*high_limit' high_limit']; %
Logic of acc>0 && up shifting
Down_shift = idle_RPM/RPM_min*[low_limit' low_limit' low_limit'
low_limit']; % Logic for acc<0 & downshifting
UpDown_shift = 1000/RPM_min*Up_shift; % Logic for acc>0 && down
shifting
Throt = [0 0.2 0.8 1];

%% Tire mu = D*sin(C*atan(B*k - E*(B*k - atan(B*k))))
D = 1.35; % Peak value
C = 1.9; % Shape
B = 10; % Stiffness
E = 0.97; % Curvature

```

```

k = [0.15 0.12 0.1 0.08 0.04 0.03 0.02 0.01]; % Slip depending on
engadged gear
mu = D*sin(C*atan(B*k - E*(B*k - atan(B*k))));

%% Braking Gain set to the 0.5*max possible as we are not interested
in braking capabilities
Brake = 0.5*Mass*g*max(mu);

%% NEDC
data = xlsread('NEDC.xlsx');
NEDC_cycle.time = data(1:11800,1);
NEDC_cycle.signals.values = data(1:11800,3); % 2 for the actual speed
and 3 for the target
NEDC_cycle.signals.dimensions = 1;

%% FTP75
data = xlsread('FTP75.xlsx');
FTP_cycle.time = [data(1:18771,1); 1877.1; 1877.2];
FTP_cycle.signals.values = [data(1:18771,3); 0; 0]; % 2 for the actual
speed and 3 for the target
FTP_cycle.signals.dimensions = 1;

%% WLTP
load('cycles_wltp.mat')
WLTP_cycle.time = WLTP_class_3.Time;
WLTP_cycle.signals.values = WLTP_class_3.Data;
WLTP_cycle.signals.dimensions = 1;

%% EM Power Engine 48 V
electrical_engine_trq_max=xlsread('Aventador_MotoreEMPow3D.xlsx',3,
'B6');
electrical_engine_torque_max=xlsread('Aventador_MotoreEMPow3D.xlsx'
,3,'P13:AA13');
electrical_engine_rpm_max=xlsread('Aventador_MotoreEMPow3D.xlsx',3,
'B4');
electrical_engine_rpm=xlsread('Aventador_MotoreEMPow3D.xlsx',3,'C12
:N12');
ind=find(electrical_engine_rpm<=electrical_engine_rpm_max);
electrical_engine_rpm=electrical_engine_rpm(ind);
electrical_engine_torque=xlsread('Aventador_MotoreEMPow3D.xlsx',3,'
B13:B37');

%% LiC: data for the single capacitor
capacitance=xlsread('Aventador_MotoreEMPow3D.xlsx',1,'B2');
n_cell=xlsread('Aventador_MotoreEMPow3D.xlsx',1,'B3');
v_min_s=xlsread('Aventador_MotoreEMPow3D.xlsx',1,'B4');
v_max_s=xlsread('Aventador_MotoreEMPow3D.xlsx',1,'B5');
i_min=xlsread('Aventador_MotoreEMPow3D.xlsx',1,'B9'); %Current
limit model are not implemented
i_max=xlsread('Aventador_MotoreEMPow3D.xlsx',1,'B10');
V0=48; %Initial voltage

%% Data for the battery of LiC
cap=capacitance/n_cell;

```

```

v_min=v_min_s*n_cell;
v_max=v_max_s*n_cell;
esr=xlsread('Aventador_MotoreEMPower_3D.xlsx',1,'B6'); %equivalent
series resistance
dc_ir=xlsread('Aventador_MotoreEMPower_3D.xlsx',1,'B7'); %leakage
resistance
max_en=0.5*cap*v_max^2; %[J]
v=xlsread('Aventador_MotoreEMPower_3D.xlsx',3,'B1:D1'); %read from
file the voltage breakpoints
rl=xlsread('Aventador_MotoreEMPower_3D.xlsx',1,'B13');

m=length(electrical_engine_torque);
n=length(electrical_engine_rpm);
z=length(v);

efficiency=zeros(m,n,z);
idc=zeros(m,n,z);

for i=1:z

efficiency(:,:,i)=xlsread('Aventador_MotoreEMPower_3D.xlsx',i+2,'C40:N
64');

idc(:,:,i)=xlsread('Aventador_MotoreEMPower_3D.xlsx',i+2,'C94:N70');
end

%% Strategy
Hyb_TrqSemDeltaGearsh_C = 0; %Driveability of the vehicle, if 0 i want
to cover the whole torque gap

Hyb_VMinForCompProt_C = 35;
Hyb_VMaxForCompProt_C = 51;
Hyb_EneMinForBoostingStrada_C = 0;
Hyb_EneMinForBoostingCorsa_C = 150000;
Hyb_EneMinForBoostingSport_C = 150000;
Hyb_NumGearForward_C = 7;
Hyb_EneEstimatedfor1gearshift_C = 25000;
Hyb_TrqDrvStradaReq_T.Value = ones(9,11) * 10;
Hyb_RpmDrvStradaReq_Bk.Value = [1500, 2500, 3500, 4500, 5500, 6500,
7500, 8500, 9000];
Hyb_rDrvStradaReq_Bk.Value = [0, 2, 5, 8, 12 , 16, 20, 25, 40, 70,
80];

Hyb_TrqDrvSportReq_T.Value = ones(9,11) * 10;
Hyb_RpmDrvSportReq_Bk.Value = [1500, 2500, 3500, 4500, 5500, 6500,
7500, 8500, 9000];
Hyb_rDrvSportReq_Bk.Value = [0, 2, 5, 8, 12 , 16, 20, 25, 40, 70, 80];

Hyb_TrqDrvCorsaReq_T.Value = ones(9,11) * 10;
Hyb_RpmDrvCorsaReq_Bk.Value = [1500, 2500, 3500, 4500, 5500, 6500,
7500, 8500, 9000];
Hyb_rDrvCorsaReq_Bk.Value = [0, 2, 5, 8, 12 , 16, 20, 25, 40, 70, 80];

Hyb_TrqMaxBRMToAvoidDamage_V.Value = [25, 25, 16, 13, 6 ,4 ,3];
Hyb_RpmMaxBRMToAvoidDamage_Bk.Value = [0, 700, 2000, 3000, 5000 ,7000
,8500];
Hyb_TrqMinBRMToAvoidDamage_V.Value = [-16, -16, -25, -27, -34 , -37 , -
38];

```

```
Hyb_RpmMinBRMToAvoidDamage_Bk.Value = [0, 700, 2000, 3000, 5000 ,7000
,8500];
Hyb_NumMaxGearForSecAir_C = 1;
Hyb_SpdMaxForSecAir_C = 5;
Hyb_EneMinReserveForSecAir_C = 0;

Hyb_swEnableSem_C = 1;

Hyb_SpdMaxSemDisengage_C = 120;
Hyb_SpdMaxGradSemEngage_C = 20;
Hyb_tiHystSemEngage_C = 200;
Hyb_TrqSemMax_C = 36;
Hyb_TrqSemMin_C = -36;
Hyb_gainFilterSemNOGearshift_C = 0.01;
Hyb_tiBoostSemEngage_C = 200;
Hyb_TrqSemBoost_C = 50;
Hyb_rBrakePos_Bk = [0, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6,
0.703125, 0.8];
Hyb_TrqEngBrake_V = zeros(1,11);
Hyb_TrqSemIdle_C = 0;

SampleTime = 0.01;

SimulationTime = 1180;

ev_10ms_Period = 2;

ev_10ms_Phase_Delay = 50;

ev_10ms_Pulse_Width = 1;
```

11.2 Appendice B: Codice MATLAB per i Risultati di Output

```
%% Plot the results
% Alessandro Franceschi

%% Plot with speeds, Command, RPM and Gear
if exist('Scope1','var')
    figure;
    subplot(2,1,1)
    plot(Scope1.time,Scope1.signals(1).values)
    grid on
    grid minor
    title('NEDC cycle - Murcielago Coupe')
    xlabel('Time [s]');
    ylabel('Speed [km/h]');
    legend('Speed target [km/h]','Murcielago speed [km/h]')
    ylim([0 125])
    subplot(2,1,2)
    plot(Scope1.time,Scope1.signals(2).values)
    grid on
    grid minor
    title('Throttle and braking - NEDC cycle - Murcielago Coupe')
    xlabel('Time [s]');
    ylabel('Throttle/Braking [%]');
    legend('Throttle','Braking');

    figure;
    subplot(2,1,1)
    plot(Scope1.time,Scope1.signals(3).values)
    grid on
    grid minor
    title('NEDC cycle - Murcielago Coupe - RPM')
    xlabel('Time [s]');
    ylabel('RPM');
    ylim([1000 2800])
    xlim([600 1200])
    subplot(2,1,2)
    plot(Scope1.time,Scope1.signals(4).values)
    grid on
    grid minor
    title('NEDC cycle - Murcielago Coupe - Gears')
    xlabel('Time [s]');
    ylabel('Gear [-]');
    xlim([600 1200])
end

%% Plot with Acc, Power, Conso Inst and Rate
if exist('Scope2','var')
    figure;
    subplot(2,1,1)
    plot(Scope1.time,Scope1.signals(1).values(:,1))
    grid on
    grid minor
    title('Own cycle')
    ylabel('Speed [km/h]')
    xlabel('Time [s]')
    xlim([0 2700])
end
```

```

subplot(2,1,2)
plot(Scope2.time,Scope2.signals(1).values)
grid on
grid minor
title('Acceleration')
ylabel('Acceleration [m/s^2]')
xlabel('Time [s]')
xlim([0 2700])

figure;
plot(Scope2.time,Scope2.signals(2).values)
grid on
grid minor
title('Power')
ylabel('Power [kW]')
xlabel('Time [s]')
figure;
plot(Scope2.time,Scope2.signals(3).values)
grid on
grid minor
title('ISFC')
ylabel('ISFC [g/kWh]')
xlabel('Time [s]')
figure;
plot(Scope2.time,Scope2.signals(4).values)
grid on
grid minor
title('Fuel rate')
ylabel('Rate [g/s]')
xlabel('Time [s]')

figure;
TB = ISFC;
[X,Y] = meshgrid(RPM,thro(1:end));
[CC,hh] = contourf(X,Y,TB(:,1:end)'./min(min(TB(:,1:end))),20);
hold on;

plot3(Scope1.signals(3).values(1:20:end),Scope1.signals(2).values(1:20
:end,1),Scope2.signals(3).values(1:20:end),'r*')
%clabel(CC,hh);
babar = colorbar('southoutside');
babar.Label.String = 'ISFC/ISFC_{min}';
title('ISFC map of the engine during the cycle with operating
point')
xlabel('RPM')
ylabel('Load [%]')
set(get(gca,'YLabel'),'Rotation',0)

end

%% Plot with Braking EN, Consu [g] and Torque[Nm]
if exist('Scope3','var')
figure;
plot(Scope3.time,Scope3.signals(1).values)
grid on
grid minor
title('Braking Energy')
ylabel('Energy [kJ]')
xlabel('Time [s]')
figure;

```

```

plot(Scope3.time,Scope3.signals(2).values)
grid on
grid minor
title('Total Consumption')
ylabel('Consumption [g]')
xlabel('Time [s]')
figure;
subplot(2,1,1)
plot(Scope1.time,Scope1.signals(1).values(:,1))
grid on
grid minor
title('NEDC - Urban part - Speed')
xlabel('Time [s]')
ylabel('Speed [km/h]')
xlim([0 200])
subplot(2,1,2)
plot(Scope3.time,Scope3.signals(3).values)
grid on
grid minor
title('NEDC - Urban part - Torque')
xlabel('Time [s]')
ylabel('Torque [Nm]')
xlim([0 200])
end

%% Plot with the Forces(Aero, Roll, Engine, Braking)
if exist('ScopeForces','var')
    figure;
    Vector = ScopeForces.signals(1).values;
    Vector=Vector(1:end,1:end);
    plot(ScopeForces.time(1:end),Vector)
    grid on
    grid minor
    legend('Wheel Force','Braking Force','Engine Force','Rolling
resistance','Aerodynamic drag')
    xlabel('Time [s]')
    ylabel('Force [N]')
    title('Acceleration - Total forces')
end

%% Plot of the oil viscosity and temperature
if exist('Scope_Oil','var')
    figure;
    [hAx,hLine1,hLine2] =
plotyy(Scope_Oil.time,Scope_Oil.signals(1).values,Scope_Oil.time,Scope
_Oil.signals(2).values,'plot');
    grid on
    grid minor
    title('Oil viscosity vs Oil temperature over time')
    xlabel('Time [s]')
    ylabel(hAx(2),'Temperature [°C]') % left y-axis
    ylabel(hAx(1),'Viscosity [mm^2/s]') % right y-axis
    set(hAx(1),'ylim',[0 150],'YTick',0:10:150)
    set(hAx(2),'ylim',[0 100],'YTick',0:10:100)
    legend('Oil Viscosity','Oil Temperature')
end

%% Plot with speeds, Command, RPM and Gear
if exist('Scope1','var') && exist('CDS','var')

```

```

figure
hold on
grid on
grid minor
yyaxis left
plot(CDS.time, CDS.signals(1).values*1E06)
ylabel('Volume (cm^3)')
yyaxis right
plot(Scope1.time, Scope1.signals(1).values(:,1))
ylabel('Speed (km/h)')
xlabel('Time (s)')
end

if exist('Scope1','var') && exist('CDS', 'var')
figure
hold on
grid on
grid minor
yyaxis left
plot(CDS.time, CDS.signals(1).values*1E06)
ylabel('Volume (cm^3)')
yyaxis right
plot(CDS.time, CDS.signals(2).values)
ylabel('Torque (Nm)')
xlabel('Time (s)')
end

%% Plot Rolling Resistances
if exist('Roll','var')
figure
hold on
grid on
grid minor
plot(Roll.time, Roll.signals.values)
ylabel('Rolling Resistance (N)')
xlabel('Time (s)')
end

%% Plot LiC
if exist('Cap','var')
figure
hold on
grid on
grid minor
plot(Cap.time, Cap.signals(1).values)
plot(Cap.time, Cap.signals(2).values)
ylabel('Voltage (V)')
xlabel('Time (s)')
legend('Terminal Voltage Vt', 'Internal Voltage Vc')
end

if exist('Supercap','var')
figure
hold on
grid on
grid minor
plot(Supercap.time, Supercap.signals(6).values)
ylabel('Torque Electric Request (Nm)')

```

```
        xlabel('Time (s)')
        title('Electric Command')
    end

    %% Plot the torque comparison

    if exist('TorqueComparison','var')
        figure
        hold on
        grid on
        grid minor
        plot(TorqueComparison.time,TorqueComparison.signals(1).values)
        plot(TorqueComparison.time,TorqueComparison.signals(2).values)
        plot(TorqueComparison.time,TorqueComparison.signals(3).values)
        ylabel('Torque (Nm)')
        xlabel('Time (s)')
        legend('Torque Mechanical', 'Torque Electric', 'Torque Total')
    end
end
```

12 Bibliografia

- [1]http://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf, United Nations Framework Convention On Climate Change.
- [2]http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/tre_glob_2014.html, Carbon Dioxide Information Analysis Center, US Department of Energy.
- [3]<https://unfccc.int/2860.php>, United Nations Climate Change.
- [4]<http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v>, Joint Research Centre, EDGAR-Emissions Database for Global Atmospheric Research.
- [5]<https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/>, Scientific consensus: Earth's climate is warming.
- [6]http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf, Paris Agreement.
- [7]<https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>, United States Environmental Protection Agency.
- [8] http://unfccc.int/land_use_and_climate_change/lulucf/items/3060.php, United Nations Climate Change.
- [9]G. Ferrari, *Motori a combustione interna*, Esculapio, 2° Ed.
- [10]N. Cavina, *Control and energy optimization of hybrid propulsion systems*, Università di Bologna, Academic year: 2016-2017.
- [11]Bosch, *Automotive Electrics and Automotive Electronics: New networking, Hybrid Drive*, 5th Ed. John Wiley & Sons.
- [12]<http://world.honda.com/automobile-technology/IMA/ima02/>, Honda Integrated Motor Assist.
- [13]<https://www.auto-types.com/autonews/mercedes-benz-showcases-the-e-300-hybrid-9346.html>, Mercedes Benz Hybrid E300.
- [14] Automotive IQ, *The Rise of 48 V Technology*, 25/10/2017.
- [15]<https://www.valeo.com/en/electric-supercharger/>, Valeo Electric Superchargers.

- [16] Guzzella, Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*, 3^o Ed.
- [17]http://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate, Battery University.
- [18]https://en.wikipedia.org/wiki/Lamborghini_Aventador, Wikipedia Lamborghini Aventador.
- [19]<https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/advanced-light-duty-powertrain-and-hybrid-analysis-alpha>, Advanced Light-Duty Powertrain and Hybrid Analysis (ALPHA) Tool, US Environmental Protection Agency.
- [20]<http://www.idsc.ethz.ch/research-guzzella-onder/downloads.html>, ETH Zurich.
- [21]<http://adv-vehicle-sim.sourceforge.net>,
<https://www.nrel.gov/transportation/systems-analysis-tools.html>, ADVISOR, National Renewable Energy Laboratory.
- [22]<https://co2mpas.io/index.html>, CO2MPAS, Joint Research Center.
- [23]Walsdorff Antoine, *Longitudinal vehicle's dynamics, energy consumption and performance modeling of sports car*, Université de Liège, Academic year: 2015-2016.
- [24]https://www.auto-data.net/en/?f=showCar&car_id=28613, Auto-Data, Lamborghini Murcielago.
- [25]<http://fastestlaps.com/models/lamborghini-murcielago-lp640>, Lamborghini Murcielago lp640.
- [26]<https://www.jsrmicro.be/emerging-technologies/lithium-ion-capacitor/products/ultimo-lithium-ion-capacitor-prismatic-cells>, JSR MICRO.
- [27] M. Eshani, Y. Gao, S. E. Gay, A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid electric & Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design*, CRC Press.
- [28]https://www.motioncontrolonline.org/content-detail.cfm/Motion-Control-Technical-Features/Interior-Permanent-Magnet-Motors-Power-Traction-Motor-Applications/content_id/789, Motion Control & Motor Association.
- [29] C. I. Hubert, *Electric Machines: Theory, Operation, Applications, Adjustment, and Control*, Merrill Publishing Company.

[30]http://hamaco-ind.com/motor_technology/index.html, Hamaco Industries Corporation.

[31]<https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/engine>, Cambridge Dictionary.

[32]G. Achtenova, J. Pakosta, *Estimation of the gearbox no-load losses*, Czech University of Prague, SAE Technical Paper 2016-01-1092, 2016, doi: 10.4271/2016-01-1092.

[33]<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r101r2e.pdf>, United Nations Economic Commission for Europe.

[34]G. Genta, *Motor Vehicle Dynamics: Modeling and Simulation*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1997.

[35]J. Y. Wong, *Theory of ground vehicles*, John Wiley and sons, Inc, 3rd ed., 2001.

[36]<https://www.autoindustriya.com/auto-industry-news/2013-lamborghini-aventador-to-come-with-cds-and-start-stop.html>, Cylinder Deactivation System .

[37]<https://www.auto-data.net/en/lamborghini-aventador-lp-700-4-coupe-6.5-v12-700hp-4wd-17484>, Lamborghini Aventador.