



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea Ottobre 2025

Sviluppo di un tool Matlab per la simulazione di un ciclo omologativo per veicoli elettrici

Relatori:

Prof. Ezio Spessa

Ing. Valerio Oliviero

Candidato:

Gianluca Gavagnin

Abstract

A causa del continuo aumento delle emissioni di gas serra a livello globale, ormai da decenni la comunità internazionale ha riconosciuto una situazione di emergenza e si sta impegnando per la riduzione delle emissioni; uno dei settori maggiormente coinvolto dall'introduzione di normative sempre più restrittive è quello automotive.

Il progetto di questa tesi, reso possibile grazie a una collaborazione con Akkodis, mi ha permesso di studiare in maniera approfondita le normative attualmente in vigore riguardanti l'omologazione sia dei veicoli con motore a combustione interna sia dei veicoli elettrici.

Il presente lavoro tratta la transizione che il settore automotive sta vivendo verso sistemi di propulsione alternativi facendo una breve introduzione e un confronto tra i punti di forza e i limiti delle principali tecnologie attualmente in sviluppo; successivamente viene proposto un approfondimento sui veicoli a trazione puramente elettrica poiché al momento vengono riconosciuti come una tra le soluzioni più promettenti per l'abbattimento delle emissioni, oltre a essere quella attualmente più sviluppata.

Il primo obiettivo di questo progetto è l'analisi dei processi necessari per l'omologazione dei veicoli, ponendo particolare attenzione alle differenze tra i processi per i veicoli con motore a combustione interna e i veicoli elettrici.

Il secondo obiettivo è lo sviluppo di un tool Matlab che consenta di simulare un ciclo omologativo per veicoli elettrici; in particolare il tool è stato pensato per essere in grado di restituire al termine della simulazione la lunghezza delle diverse fasi del ciclo e una stima della curva di scarica della batteria. I risultati ottenuti sono infine stati confrontati con alcuni test reali per verificare la corrispondenza tra simulazione e dati reali.

Sommario

Abstract.....	3
Indice delle Figure	6
Indice delle Tabelle	8
1. Introduzione	11
1.1 Le emissioni a livello mondiale	13
1.2 L'effetto dei diversi inquinanti	15
1.3 Il ruolo del settore dei trasporti	17
2. Soluzioni per ridurre le emissioni	19
2.1 Veicoli ICE.....	19
2.2 HEV	20
2.3 BEV	21
2.4 Biocombustibili	21
2.5 Veicoli a idrogeno	22
2.6 Bilancio e confronto delle alternative presentate	23
3. Perché i BEV	26
3.1 Gli aspetti positivi	26
3.2 Le criticità dei veicoli totalmente elettrici	28
3.3 I BEV contribuiscono realmente ad abbattere le emissioni?	35
4. Contesto normativo in Europa	44
4.1 Normativa per le emissioni di inquinanti.....	44
4.2 Normativa per le emissioni di CO ₂	46
5. Il processo omologativo per i veicoli leggeri in Europa.....	48
5.1 WLTC per veicoli leggeri ICE.....	50
5.2 Downscaling del ciclo WLTC	55
5.3 Modifica per veicoli con velocità massima inferiore a quella prevista.....	57
5.4 WLTC per veicoli BEV	58
6. Sviluppo di un tool Matlab per la simulazione di un ciclo omologativo per veicoli elettrici	61
6.1 Struttura del tool	61
6.2 Acquisizione dei dati di input	63
6.3 Costruzione del ciclo	64
6.4 Stima dello stato della batteria	69

6.5 Confronto tra potenze	74
7. Possibili aspetti futuri.....	81
Bibliografia e Sitografia	82

Indice delle Figure

Figura 1 Andamento domanda e offerta di petrolio in USA e Cina. Fonte: (IEA, Oil 2025, Executive summary, 2025)	12
Figura 2 Andamento emissioni CO2 nel tempo. Fonte: (IEA, CO2 emissions in 2023, 2023) ..	13
Figura 3 Impatto delle energie rinnovabili sulla riduzione delle emissioni. Fonte: (IEA, CO2 emissions in 2023, 2023)	14
Figura 4 Impatto del settore dei trasporti sulle emissioni. Fonte: (Jaramillo, 2022)	17
Figura 5 Tipici punti di funzionamento motore ICE. Fonte: (Prof. Rolando, 2025)	20
Figura 6 Tipici punti di funzionamento di motore ICE con tecnologia full hybrid. Fonte: (Prof. Rolando, 2025)	21
Figura 7 Schema riassuntivo biofuels. Fonte: (Cavelius, et al., 2023)	22
Figura 8 Confronto impatto ambientale tra le diverse tecnologie. Fonte: (Acar & Dincer, 2020)	23
Figura 9 Grafico che mostra un confronto fra le diverse tecnologie. Fonte: (Acar & Dincer, 2020)	25
Figura 10 Andamento tipico di coppia di un motore elettrico. Fonte: (Prof. Vaschetto, 2025) ..	26
Figura 11 Andamento tipico di coppia di un motore ICE turbo. Fonte: (Prof. Millo, 2025)	27
Figura 12 Schema di connessione alla rete elettrica di un powertrain elettrico. Fonte: (Ehsani, Veer Singh, Om Bansal, & Mehrjadi, 2021)	28
Figura 13 Rappresentazione schematica delle diverse infrastrutture di ricarica connettiva. Fonte: (Prof. Vaschetto, 2025)	30
Figura 14 Profilo di ricarica ideale. Fonte: (Prof. Vaschetto, 2025)	31
Figura 15 Andamento della richiesta di energia elettrica per la trazione di veicoli. Fonte: (IEA, Global EV Outlook, 2024)	32
Figura 16 Provenienza delle batterie per trazione di veicoli nel mondo. Fonte: (IEA, Global EV Outlook, 2024)	33
Figura 17 Andamento del costo dei materiali per la produzione di batterie nel tempo. Fonte: (IEA, Global EV Outlook, 2024)	34
Figura 18 Emissioni non tailpipe dei veicoli a trazione elettrica. Fonte: (Beddows & Harrison, 2021)	35
Figura 19 Impatto ambientale convertendo un veicolo ICE in un BEV. Fonte: (Beddows & Harrison, 2021)	36
Figura 20 Report dell'EEA sulle emissioni di CO2 al km per diverse tecnologie. Fonte: (EEA, 2018)	37
Figura 21 Confronto emissioni tra BEV, M-HEV, F-HEV di diversi segmenti con previsione 2022-2034. Fonte: (Grimaldi & Capaldi, 2024)	38
Figura 22 Confronto emissioni tra BEV, M-HEV, F-HEV di diversi segmenti con previsione BAU 2035-2047. Fonte: (Grimaldi & Capaldi, 2024)	39
Figura 23 Confronto emissioni tra BEV, M-HEV, F-HEV di diversi segmenti con previsione FF55 2035-2047. Fonte: (Grimaldi & Capaldi, 2024)	39

Figura 24 Fonti per la produzione dell'energia elettrica in Norvegia (a) Emissioni totali di CO ₂ tra diversi tipi di veicoli (b). Fonte: (Yang, Liu, Yang, & Lu, 2023)	40
Figura 25 Fonti utilizzate per la produzione di energia elettrica in India. Fonte: (Nandola, Krishna, Pramanik, Himabindu, & Ravikrishna, 2025)	41
Figura 26 Emissioni di CO ₂ per la produzione dei diversi combustibili e dell'energia elettrica. Fonte: (Nandola, Krishna, Pramanik, Himabindu, & Ravikrishna, 2025)	42
Figura 27 Emissioni tailpipe dei veicoli considerati. Fonte: (Nandola, Krishna, Pramanik, Himabindu, & Ravikrishna, 2025)	42
Figura 28 WTW dei veicoli considerati in India. Fonte: (Nandola, Krishna, Pramanik, Himabindu, & Ravikrishna, 2025)	43
Figura 29 Primo ciclo omologativo introdotto. Fonte: (CEE, 1991)	44
Figura 30 Punti motore ciclo NEDC. Fonte dati: (Prof. Millo, 2025)	49
Figura 31 Carichi motore durante ciclo NEDC. Fonte: (Prof. Millo, 2025)	49
Figura 32 Fase low del ciclo WLTC. Fonte: (UNECE, 2021)	51
Figura 33 Fase medium del ciclo WLTC. Fonte: (UNECE, 2021)	52
Figura 34 Fase high del ciclo WLTC. Fonte: (UNECE, 2021)	52
Figura 35 Fase extra-high del ciclo. Fonte: (UNECE, 2021)	53
Figura 36 Ciclo completo WLTC per veicoli ICE	53
Figura 37 Punti di funzionamento motore durante il ciclo WLTC. Fonte dati: (Prof. Millo, 2025)	54
Figura 38 Carichi motore durante il ciclo WLTC. Fonte: (Prof. Millo, 2025)	54
Figura 39 Esempio di downscaling applicabile secondo normativa. Fonte: (UNECE, 2021) ...	56
Figura 40 Esempio di ciclo WLTC con procedura abbreviata per veicoli BEV	59
Figura 41 Flowchart funzionamento del tool Matlab	62
Figura 42 Interfaccia utente del tool	63
Figura 43 Costruzione del primo ciclo WLTC per veicoli elettrici col tool	64
Figura 44 Costruzione del primo ciclo WLTC per veicoli BEV con velocità limitata a 90 km/h	65
Figura 45 Ciclo omologativo completo con velocità nel tratto a velocità costante a 100 km/h	66
Figura 46 Ciclo omologativo completo con velocità nel tratto a velocità costante a 130 km/h	67
Figura 47 Ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 100 km/h	67
Figura 48 Ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 90 km/h e massa inferiore rispetto ai precedenti	68
Figura 49 Andamento SOE lungo il primo ciclo con veicolo che è in grado di seguire il ciclo senza limitazioni	70
Figura 50 Andamento SOE lungo il primo ciclo con veicolo limitato a 90 km/h	71
Figura 51 Andamento SOE lungo il ciclo omologativo completo senza limitazioni e percorrendo il tratto a velocità costante a 100 km/h	72
Figura 52 Andamento SOE lungo il ciclo omologativo completo senza limitazioni e percorrendo il tratto a velocità costante a 130 km/h	72
Figura 53 Andamento SOE lungo il ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 90 km/h	73

Figura 54 Andamento SOE lungo il ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 90 km/h e massa minore rispetto al precedente.....	73
Figura 55 Potenze lungo il primo ciclo WLTC per BEV senza restrizioni	74
Figura 56 Potenze lungo il primo ciclo WLTC per BEV con velocità massima di 90 km/h.....	75
Figura 57 Andamento potenze lungo un ciclo omologativo completo senza limitazioni e percorrendo i tratti a velocità costante a 100 km/h.....	76
Figura 58 Andamento potenze lungo un ciclo omologativo completo senza limitazioni e percorrendo i tratti a velocità costante a 130 km/h.....	76
Figura 59 Andamento potenze lungo un ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 90 km/h	77
Figura 60 Andamento potenze lungo un ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 90 km/h e massa minore rispetto ai veicoli precedenti	77
Figura 61 Confronto tra dati sperimentali e simulati. Veicolo 1	78
Figura 62 Confronto tra dati sperimentali e simulati. Veicolo 2	79
Figura 63 Confronto tra dati sperimentali e simulati dopo l'applicazione di un fattore correttivo. Veicolo 1	80
Figura 64 Confronto tra dati sperimentali e simulati dopo l'applicazione di un fattore correttivo. Veicolo 2	80

Indice delle Tabelle

Tabella 1 Tabella di confronto sull'impatto ambientale delle diverse tecnologie. Fonte: (Acar & Dincer, 2020).....	24
Tabella 2 Confronto tra le diverse potenze di ricarica conduttiva. Fonte: (Prof. Vaschetto, 2025)	29
Tabella 3 Tabella riassuntiva delle pause consentite dalla normativa. Fonte: (UNECE, 2021)	60

1. Introduzione

La comunità scientifica ha iniziato a interrogarsi riguardo il bilanciamento energetico terrestre e l'effetto dei gas serra sin dalla fine del XVIII secolo; in particolare il fisico irlandese John Tyndall scoprì che la CO_2 e il vapore acqueo fossero in grado di assorbire le radiazioni infrarosse. Tuttavia il primo che mise in relazione la variazione della temperatura sulla Terra e la concentrazione di anidride carbonica fu lo svedese Arrhenius con la pubblicazione dell'articolo "On the influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground" (Arrhenius, 1896).

Arrhenius fece numerosi calcoli e ipotesi giungendo alla conclusione che un eventuale raddoppiamento o dimezzamento della concentrazione di CO_2 nell'atmosfera comporti un aumento o diminuzione della temperatura di circa 5-6 °C. Tuttavia il contesto industriale in quel periodo era molto differente rispetto a quello attuale, di conseguenza ipotizzò anche che per raddoppiare la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera ci volessero all'incirca 3000 anni.

Il problema fu ripreso qualche anno dopo quando Callendar cercò di dimostrare una correlazione tra il riscaldamento globale e la concentrazione di CO_2 e al termine dei suoi studi riuscì a dimostrare che circa metà del riscaldamento che si era verificato tra il 1880 e il 1935 fosse dovuto alle variazioni di CO_2 .

Tuttavia anche Callendar non prevedeva i potenziali effetti negativi del riscaldamento globale ma anzi ipotizzò che ci potessero essere dei benefici sociali, come per esempio un aumento della produzione agricola e di conseguenza non si diede particolare peso al fenomeno.

Il problema è dunque stato apparentemente trascurato negli anni successivi, fino al 1972 quando venne pubblicato lo scritto "The Limits to Growth", dove venne evidenziato che se la società avesse continuato a perseguire una crescita economica senza considerare i costi ambientali e sociali si sarebbe raggiunto un punto in cui le risorse terrestri non sarebbero più bastate, con un conseguente declino delle condizioni economiche e sociali (Meadows, Meadows, Randers, & Behrens III, 1972).

Anche le realtà industriali avevano iniziato ad avere una certa consapevolezza del loro ruolo riguardo all'aumento della concentrazione di CO_2 nell'atmosfera e l'impatto negativo di questa sull'ambiente. A prova di ciò è stato reso pubblico un rapporto realizzato da Shell nel 1988 che fa luce sulle conoscenze dell'azienda in materia di climatologia e sul ruolo che ricopriva nelle emissioni globali di CO_2 oltre che sulle possibili risposte politiche e sociali applicabili. In particolare il documento rivela che la Shell commissionasse rapporti sull'effetto serra già dal 1981 (R.P.W.M. Jacobs, 1988).

Nel rapporto viene riconosciuto dall'azienda l'impatto importante che ha la combustione dei combustibili fossili sulle emissioni di CO_2 e di come potrebbe essere troppo tardi quando il fenomeno diventerà rilevabile.

Nonostante questo documento rappresenti il primo rapporto riguardo la responsabilità climatica di una grande azienda petrolifera sul cambiamento climatico, negli anni sono emersi altri documenti simili appartenenti ad altre aziende mettendo in luce come il problema del riscaldamento globale fosse riconosciuto già da molto tempo ma fu semplicemente ignorato.

Negli anni successivi anche la politica della maggior parte dei paesi industrializzati si è resa conto che fosse necessario cercare di tenere sotto controllo le emissioni di gas serra e nel 1997 venne

adottato il protocollo di Kyoto, il cui obiettivo principale era proprio quello di diminuire le emissioni di diversi gas serra tra cui la CO_2 e gli ossidi di azoto. In particolare il protocollo poneva il limite di ridurre almeno del 5% le emissioni dei gas serra del 1990 tra il 2008 e il 2012 e fu ratificato da tutti i paesi dell'Unione Europea.

A partire dal protocollo di Kyoto seguirono diversi accordi internazionali per gestire il problema del cambiamento climatico; in particolare nel 2015 è stato siglato un altro accordo storico che ha sancito l'impegno da parte della comunità internazionale di mantenere l'aumento della temperatura al di sotto dei 2°C con l'obiettivo di azzerare le emissioni di gas serra entro il 2050.

L'ultimo incontro della comunità internazionale per il controllo del cambiamento climatico ha portato a un accordo che ha preso il nome di "Patto di Glasgow" siglato nel 2021 che a differenza dei precedenti menziona esplicitamente il carbone come fattore principale per il cambiamento climatico in atto (Falduto, 2021).

Nonostante questi impegni presi dai diversi paesi, analizzando i dati sul consumo di petrolio si può notare che non vi è stata una diminuzione, ma anzi un aumento della domanda.

Infatti tra il 2015 e il 2024 gli Stati Uniti hanno rappresentato il 90% dell'aumento dell'offerta superando i 20 milioni di barili al giorno e la domanda di petrolio da parte della Cina ha rappresentato il 60% dell'aumento globale del consumo di petrolio (IEA, Oil 2025, Executive summary, 2025).

Inoltre si prevede che la domanda globale di petrolio aumenterà fino a raggiungere il massimo di 105,5 milioni di barili al giorno entro il 2030 per poi avere una diminuzione della domanda, come si può vedere in figura 1.

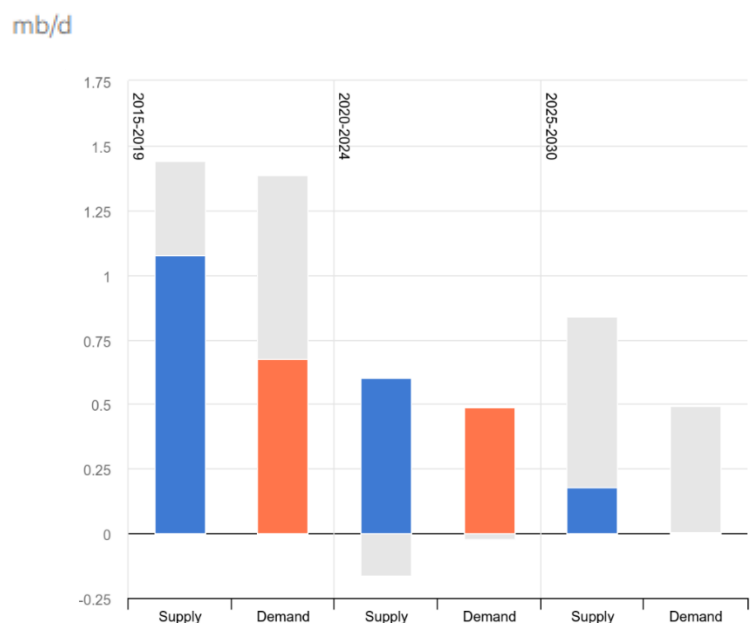


Figura 1 Andamento domanda e offerta di petrolio in USA e Cina. Fonte: (IEA, Oil 2025, Executive summary, 2025)

1.1 Le emissioni a livello mondiale

Si è visto dunque che da circa 30 anni il problema delle emissioni di CO_2 è un problema riconosciuto internazionalmente e questo ha portato all'attuazione di diversi provvedimenti dei principali paesi industrializzati.

Andando ad analizzare i dati riguardanti le emissioni di CO_2 legate alla produzione di energia, tuttavia, si può notare che dagli anni '90 ad oggi il livello di emissioni a livello globale è vertiginosamente cresciuto; l'andamento è visibile in figura 2.

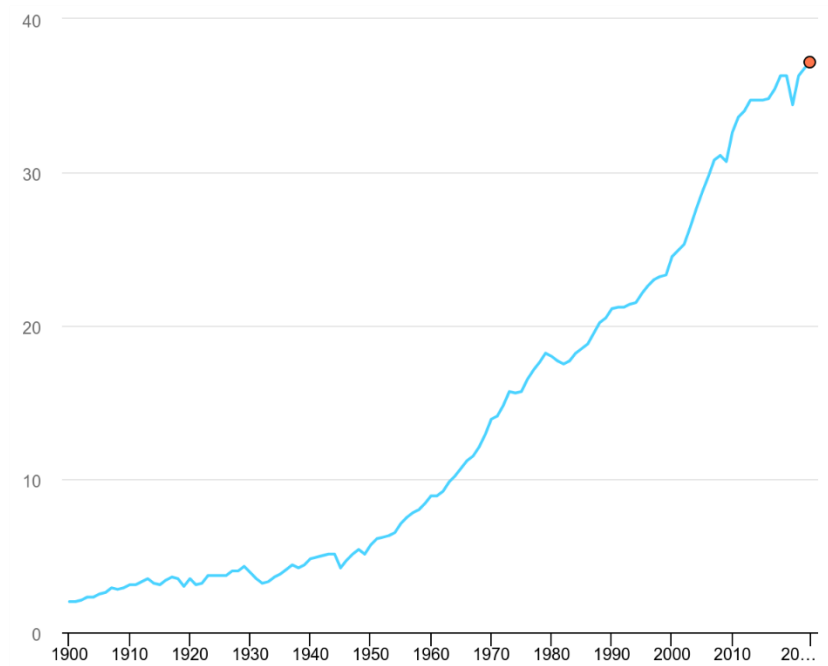


Figura 2 Andamento emissioni CO_2 nel tempo. Fonte: (IEA, *CO2 emissions in 2023*, 2023)

Analizzando l'andamento si nota come la crescita delle emissioni da dopo il 1950 abbia visto una crescita verticale e costante; l'unico momento in cui si riconosce una vera riduzione significativa delle emissioni è nel 2020 a causa dell'emergenza sanitaria a livello mondiale.

Guardando questi dati si potrebbe pensare che tutti i protocolli e gli accordi citati in precedenza siano stati inutili, tuttavia senza questi sforzi da parte della comunità internazionale i dati che vedremmo sarebbero decisamente peggiori; il grafico visibile in figura 3 mostra come l'utilizzo di energie rinnovabili abbia permesso di mantenere bassi gli innalzamenti delle emissioni tra il 2019 e il 2023.

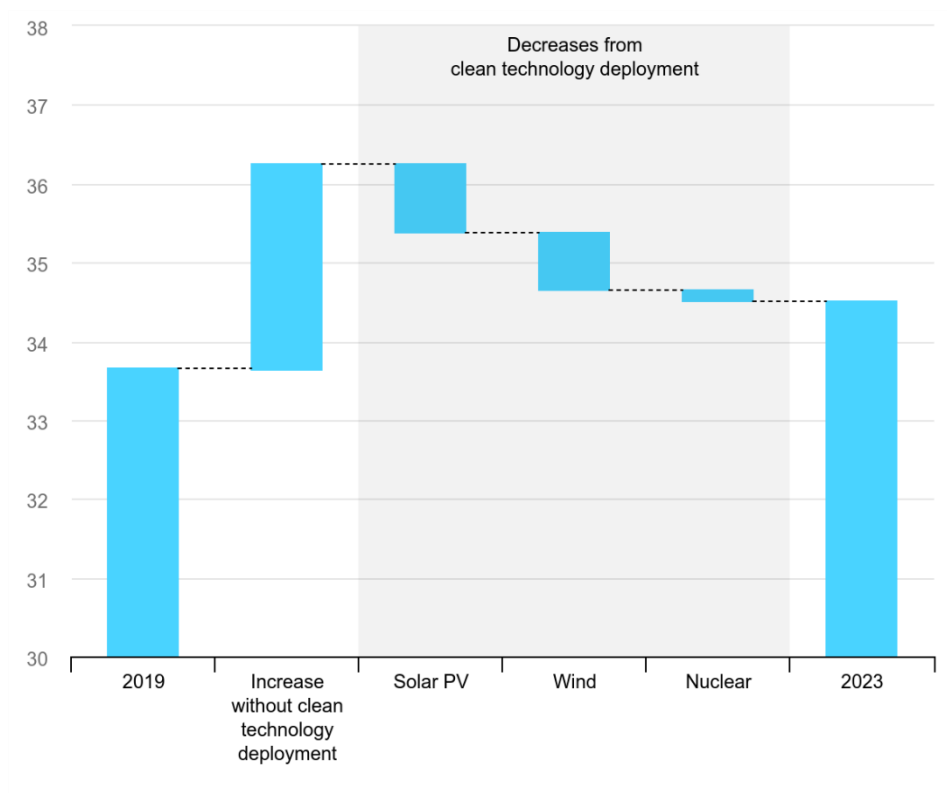


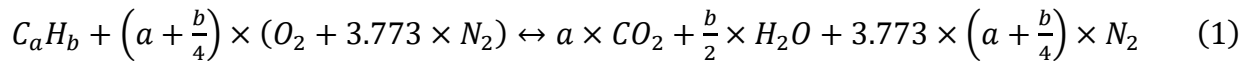
Figura 3 Impatto delle energie rinnovabili sulla riduzione delle emissioni. Fonte: (IEA, CO2 emissions in 2023, 2023)

Il grafico mostra in maniera evidente come senza l'utilizzo delle energie rinnovabili si sarebbe ottenuto un aumento delle emissioni di 3 volte superiori rispetto a quanto realmente avvenuto (IEA, CO2 emissions in 2023, 2023).

1.2 L'effetto dei diversi inquinanti

Fino ad ora ci siamo concentrati principalmente sull'effetto della CO_2 sull'ambiente; in questo paragrafo vengono invece approfonditi gli altri prodotti della combustione, in particolare quelli che ritroviamo allo scarico dei veicoli con motore a combustione interna visto che questo progetto di tesi è incentrato principalmente sull'omologazione dei veicoli.

In un processo di combustione ideale non si dovrebbe ottenere nessun prodotto tossico, come si nota dalla reazione di combustione ideale:



Dove il rapporto b/a per combustibili come la benzina o il Diesel è di circa 1.85 (Prof. Spessa, 2023).

Tuttavia il processo di combustione che avviene realmente è differente da quello ideale e di conseguenza, anche se in minima parte, si ottengono altri prodotti che risultano essere tossici per l'uomo e dannosi per l'ambiente.

Gli inquinanti prodotti possono essere divisi in due categorie:

- Inquinanti primari: sono quegli inquinanti che vengono direttamente emessi dal veicolo e che possono essere ritrovati allo scarico dello stesso;
- Inquinanti secondari: sono quei composti che si formano nell'ambiente in seguito a una reazione tra due inquinanti primari o tra un inquinante primario e sostanze presenti nell'atmosfera.

Vengono ora mostrati gli inquinanti primari sia dei veicoli ad accensione comandata (SI) sia dei veicoli ad accensione per compressione (CI).

Monossido di carbonio CO

È un inquinante che si ritrova sia allo scarico dei veicoli ad accensione comandata sia dei veicoli ad accensione per compressione, ma con una concentrazione minore in questi ultimi. La causa principale per cui allo scarico si ottiene CO è la mancanza di ossigeno, infatti durante la combustione tutto il combustibile viene trasformato in CO e poi solo una parte riesce a ossidare in CO_2 ; inoltre bisogna tenere in considerazione che per temperature superiori ai 1890K il fenomeno della dissociazione della CO_2 in CO diventa non trascurabile.

L'effetto della CO sulla salute umana è estremamente negativo, motivo per cui è necessario tenere sotto controllo le emissioni di questo inquinante.

Ossidi di azoto NO_x

Gli ossidi di azoto si trovano sia allo scarico dei veicoli SI sia allo scarico dei veicoli CI, tuttavia la loro composizione è diversa; infatti per veicoli SI parla principalmente di NO mentre per veicoli CI si ha una concentrazione non trascurabile anche di NO_2

Gli ossidi di azoto sono fattori principali nella formazione del fenomeno che prende il nome di smog fotochimico, un fenomeno complesso che si genera a causa dell'interazione tra NO_x , idrocarburi incombusti (HC) e la luce solare.

L'effetto di questi inquinanti sulla salute umana sono degli irritanti per il sistema respiratorio umano.

Gli NO_x tuttavia sono classificati come degli inquinanti con una scala d'azione a livello regionale, ovvero gli effetti della loro concentrazione nell'aria possono avere un impatto entro un raggio di circa 1000 km rispetto al punto di emissione; per questo motivo in alcuni contesti si hanno delle regolamentazioni differenti in base all'area geografica che si prende in considerazione.

Idrocarburi incombusti HC

A differenza degli inquinanti precedenti non hanno una composizione chimica ben definita e la loro formazione è causata da una serie di fenomeni complessi che si verificano durante il normale funzionamento di un motore a combustione interna.

Le emissioni di questi inquinanti sono maggiori per veicoli ad accensione comandata ma gli idrocarburi incombusti allo scarico dei veicoli ad accensione per compressione sono generalmente più reattivi.

Particolato PM

Definire il particolato da un punto di vista chimico è particolarmente complesso e in generale viene definito come tutto ciò che viene raccolto su un filtro dopo aver diluito i gas con aria ambiente a una temperatura di 50 °C circa.

È un inquinante che si trova principalmente allo scarico dei veicoli ad accensione per compressione e solo nei veicoli più recenti nei motori ad accensione comandata a iniezione diretta.

Il particolato è classificato come un inquinante a livello locale il cui raggio di azione è limitato a circa una decina di chilometri dal punto di emissione.

L'effetto che questo inquinante ha sulla salute umana è un tema centrale, in quanto le dimensioni delle particelle di particolato possono essere talmente piccole da riuscire a raggiungere la regione polmonare.

1.3 Il ruolo del settore dei trasporti

Un ruolo importante a livello globale sulle emissioni di gas serra sicuramente lo gioca il settore dei trasporti, si stima infatti che questo sia il responsabile del 15% delle emissioni di gas serra a livello mondiale e circa il 23% delle emissioni globali di CO_2 (Jaramillo, 2022), mentre l'EPA (Environmental Protection Agency) ha stimato che nel 2022 le emissioni dirette e indirette di gas serra derivanti dal settore dei trasporti siano state il 29% delle emissioni totali negli Stati Uniti (EPA, 2025).

In figura 4 viene mostrato l'andamento nel tempo delle emissioni di CO_2 equivalente dal settore dei trasporti dal 1990 fino al 2019.



Figura 4 Impatto del settore dei trasporti sulle emissioni. Fonte: (Jaramillo, 2022)

Nella figura 4a viene riportato l'impatto di emissioni indirette di CO_2 , il dato rappresenta le emissioni legate all'elettrificazione per lo più dei sistemi ferroviari, ma non tiene conto del ciclo di vita del prodotto.

Come si può facilmente vedere anche nel settore dei trasporti le emissioni di gas serra sono decisamente aumentate dal 1990 ad oggi nonostante i tentativi di limitare le emissioni dei veicoli nuovi immessi sul mercato tramite limiti omologativi sempre più stringenti.

2. Soluzioni per ridurre le emissioni

Nel capitolo precedente si è dato uno sguardo al contesto globale e al ruolo che il settore dei trasporti ha nelle emissioni di gas serra a livello globale; in questo capitolo invece daremo uno sguardo alle diverse soluzioni e le tecnologie che i costruttori, nello specifico di autoveicoli, hanno implementato nel corso degli anni e quelle che al momento sembrano essere le più futuribili per sottostare alle normative sempre più stringenti in termini di emissioni.

2.1 Veicoli ICE

Iniziamo questa analisi prendendo in considerazione i veicoli tradizionali ICE (internal combustion engine). Normalmente possiamo stimare che la percentuale di energia chimica contenuta dal combustibile che si trasforma in energia meccanica disponibile all'albero motore è di circa il 33%; questa energia viene utilizzata in parte per vincere la resistenza aerodinamica e comandare gli ausiliari, mentre la restante parte viene persa per attriti sulla trasmissione e per vincere l'inerzia del veicolo (Prof. Spessa, 2023).

Per ridurre il consumo di carburante (e di conseguenza le emissioni) quindi si hanno due possibilità:

- Aumentare l'efficienza del motore, quindi avere una percentuale di energia meccanica disponibile maggiore;
- Migliorare gli elementi di resistenza o perdita nell'utilizzo del veicolo.

Attualmente si è già raggiunta un'ottima efficienza dei motori in generale quindi è difficile andare ad aumentare sensibilmente quel valore di energia disponibile, di conseguenza, quello che si può fare è cercare di agire sugli altri elementi:

- Riduzione della resistenza al rotolamento

Dal 2012 tutti gli pneumatici devono essere testati e classificati secondo una normativa europea, quindi quello che un costruttore può fare è montare degli ottimi pneumatici e installare dei sistemi automatici per il controllo della pressione degli stessi ed evitare una riduzione di efficienza nel tempo.

- Riduzione resistenza all'avanzamento

Il coefficiente di resistenza aerodinamica è stato notevolmente migliorato dagli anni '70 ad oggi, tuttavia attualmente si sta assistendo a una situazione di stallo in quanto il miglioramento ulteriore del coefficiente di resistenza all'avanzamento c_x imporrebbe una forma della vettura che non troverebbe un riscontro positivo sul mercato, rendendo di fatto vano il miglioramento. In ogni caso ad oggi il valore di questo coefficiente è già molto buono.

- Riduzione del peso

In contrasto con quanto ci si potrebbe aspettare, attualmente le vetture sono in media molto più pesanti rispetto a quelle del 2000, questo perché sono aumentati gli standard di sicurezza e anche i comfort offerti dai veicoli quindi ad oggi è difficile pensare di andare ad agire positivamente su questo fattore.

2.2 HEV

Un'alternativa ai veicoli puramente ICE sono i veicoli che prendono il nome di HEV ovvero gli "Hybrid electric vehicles"; questa nomenclatura viene assegnata ai veicoli che utilizzano in simbiosi sia un motore a combustione interna sia un motore elettrico; sebbene la maggior parte dei veicoli presenti sul mercato presentino una configurazione ibrida con motori ad accensione comandata prevalentemente per motivi di costi, ci sono alcuni esempi di questa tecnologia anche con motori ad accensione per compressione. Attualmente questo tipo di veicoli rappresentano un ottimo compromesso per ridurre le emissioni di gas serra.

Questi veicoli prendono nomi diversi in base alla capacità del powertrain elettrico di assistere o muovere in autonomia la vettura e sulla base delle logiche di funzionamento con cui viene fatta muovere, oltre che sulla struttura di base del powertrain ibrido.

In ogni caso l'idea di base è quella di sfruttare il motore elettrico per far lavorare il motore a combustione interna nel range di massima efficienza andando quindi a limitare notevolmente sia i consumi di combustibile sia le emissioni.

Nelle figure 5 e 6 si può vedere come cambi la zona di funzionamento del motore termico in un ciclo guida di riferimento in un veicolo ICE in confronto a un veicolo ibrido parallelo.

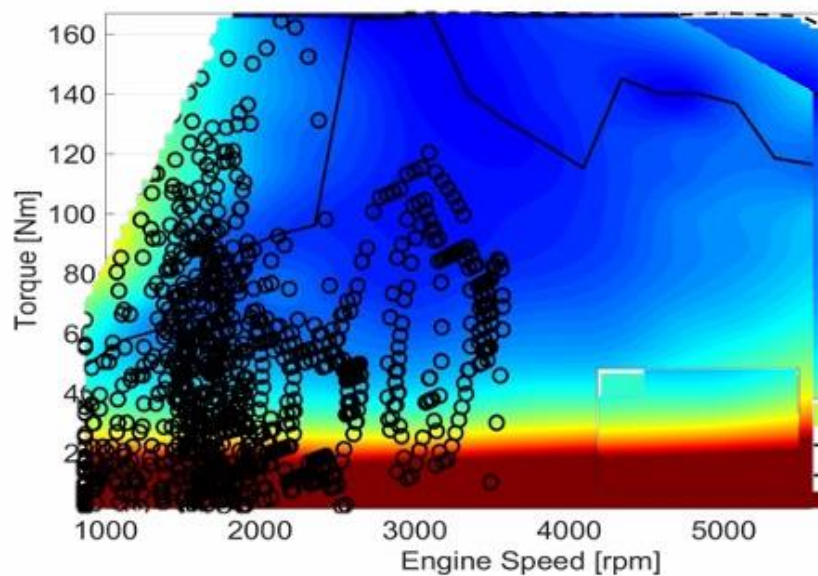


Figura 5 Tipici punti di funzionamento motore ICE. Fonte: (Prof. Rolando, 2025)

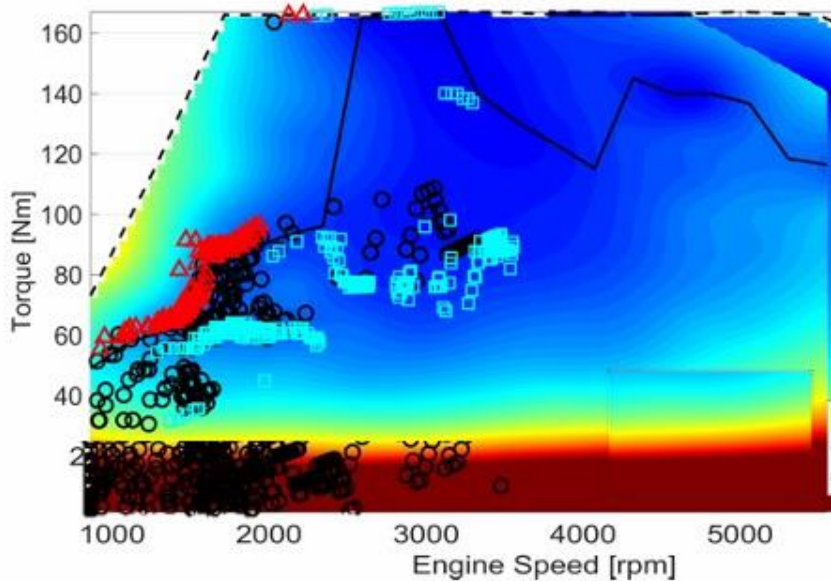


Figura 6 Tipici punti di funzionamento di motore ICE con tecnologia full hybrid. Fonte: (Prof. Rolando, 2025)

Si può vedere come nella seconda figura i punti operativi del motore rimangono molto più vicini alla curva di massimo rendimento del motore rispetto ai punti operativi che si hanno nel grafico riguardante veicoli solo ICE.

2.3 BEV

Prendono il nome di BEV (battery electric vehicles) i veicoli puramente elettrici a batteria; questi vengono anche riconosciuti come veicoli a emissioni zero, poiché allo scarico non si hanno alcun tipo di emissioni; negli ultimi anni e ancora attualmente l'Unione Europea vede in questa soluzione il futuro della mobilità via terra e cerca di promuovere lo sviluppo di veicoli che sfruttino questa tecnologia e la loro diffusione. Tuttavia vedremo in un capitolo successivo che anche questi presentano delle emissioni “nascoste” che è bene tenere in considerazione quando si trattano questi veicoli.

Inoltre la diffusione di questa tecnologia sta riscontrando una maggiore difficoltà di quella prevista a causa dei costi e di alcune limitazioni attualmente presenti, tra le quali si può citare la limitata autonomia e i tempi di ricarica rispetto ai veicoli ICE.

2.4 Biocombustibili

I biocombustibili si presentano come un'opportunità per ridurre le emissioni di gas serra poiché non sono di origine fossile ma derivano da biomassa di origine vegetale o animale.

I biocombustibili come visibile in figura 7 sono classificabili in 4 differenti categorie dette “Generation” a seconda della loro origine di produzione e le tecnologie utilizzate.

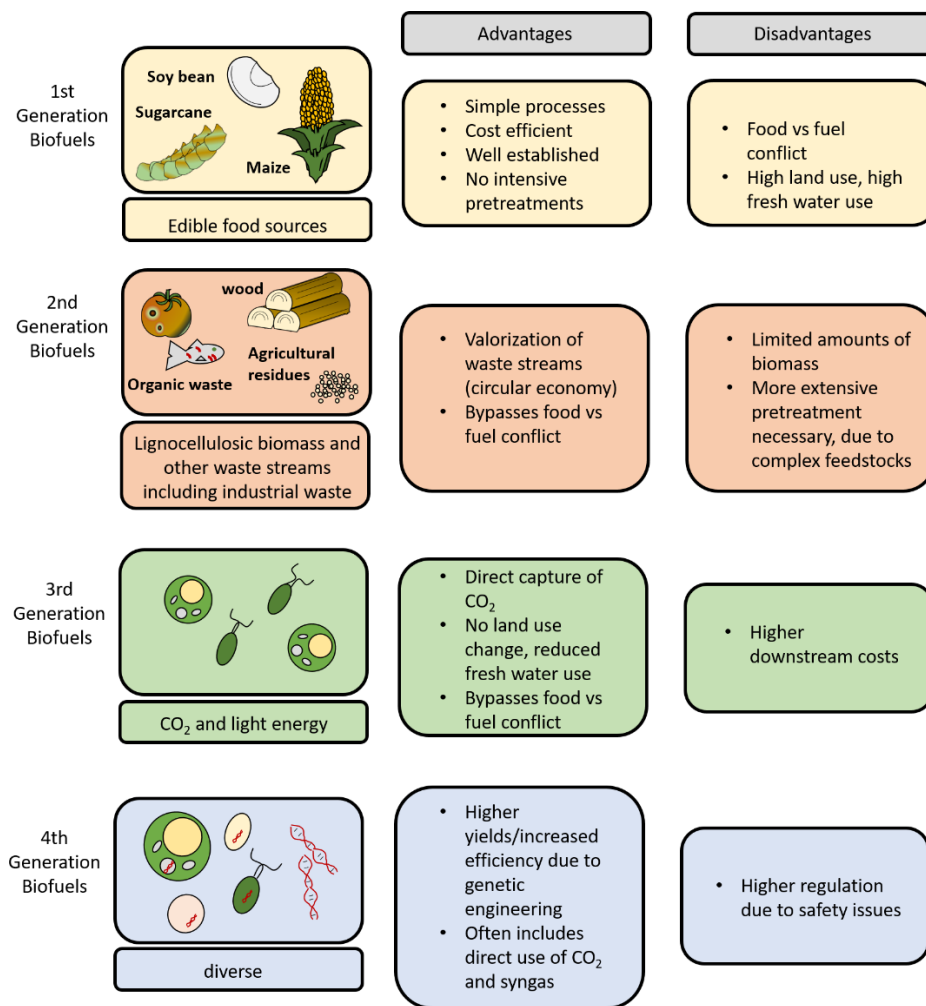


Figura 7 Schema riassuntivo biofuels. Fonte: (Cavelius, et al., 2023)

Attualmente i biocombustibili prodotti appartengono prevalentemente alla prima e alla seconda generazione di biofuels tra i quali possiamo citare l'etanolo e il biodiesel. È evidente come i biocombustibili di prima generazione presentino un problema etico e sociale venendo prodotti da colture tipicamente utilizzate per la produzione di cibo.

Le possibilità di riduzione delle emissioni da parte di questa tecnologia sono molto promettenti e attualmente i combustibili presenti sul mercato possono contenere una piccola percentuale di biocombustibili al loro interno, e ci si aspetta che in futuro abbiano un'importanza sempre maggiore (Cavelius, et al., 2023) (Cherwoo, et al., 2023).

2.5 Veicoli a idrogeno

L'idrogeno viene considerato un vettore energetico estremamente promettente per la riduzione delle emissioni di gas serra in diversi ambiti, tra cui anche quello automotive. Attualmente i veicoli alimentati a idrogeno possono presentare due configurazioni differenti:

- Veicoli a fuel cell;
- Veicoli con ICE.

La prima tipologia di veicoli si avvicina maggiormente alla mobilità elettrica in quanto all'interno del veicolo avviene la conversione dell'idrogeno in energia elettrica che verrà utilizzata per la propulsione, di conseguenza questo tipo di veicoli non presenta emissioni di tipo tail pipe.

I veicoli invece che presentano un motore a combustione interna alimentato a idrogeno funzionano in modo analogo a quelli "tradizionali"; sebbene la combustione di idrogeno di per sé non presenti la produzione di emissioni inquinanti, un motore a combustione necessita di olii e additivi che durante il funzionamento generano delle emissioni di gas serra.

Queste due soluzioni sono molto promettenti, tuttavia l'impatto ambientale dipende anche da come l'idrogeno viene prodotto, inoltre il trasporto e lo stoccaggio di questo vettore energetico presenta sfide decisamente maggiori rispetto alle altre soluzioni viste in precedenza.

2.6 Bilancio e confronto delle alternative presentate

Dopo aver presentato le principali tecnologie in sviluppo per la riduzione delle emissioni di gas serra, viene presentata una sintetica comparativa generale, basata su un'analisi del lavoro pubblicato da Acar Canan (Acar & Dincer, 2020).

L'analisi è stata eseguita tramite un'analisi LCA secondo la procedura "guida operativa agli standard ISO" pubblicata dal Centro di Scienze Ambientali dell'Università di Leida.

I risultati riguardo le emissioni di gas serra sono presentate secondo il parametro di "Potenziale di riscaldamento globale" (GWP) e viene anche valutato il potenziale di acidificazione delle emissioni; in figura 8 sono visibili i risultati.

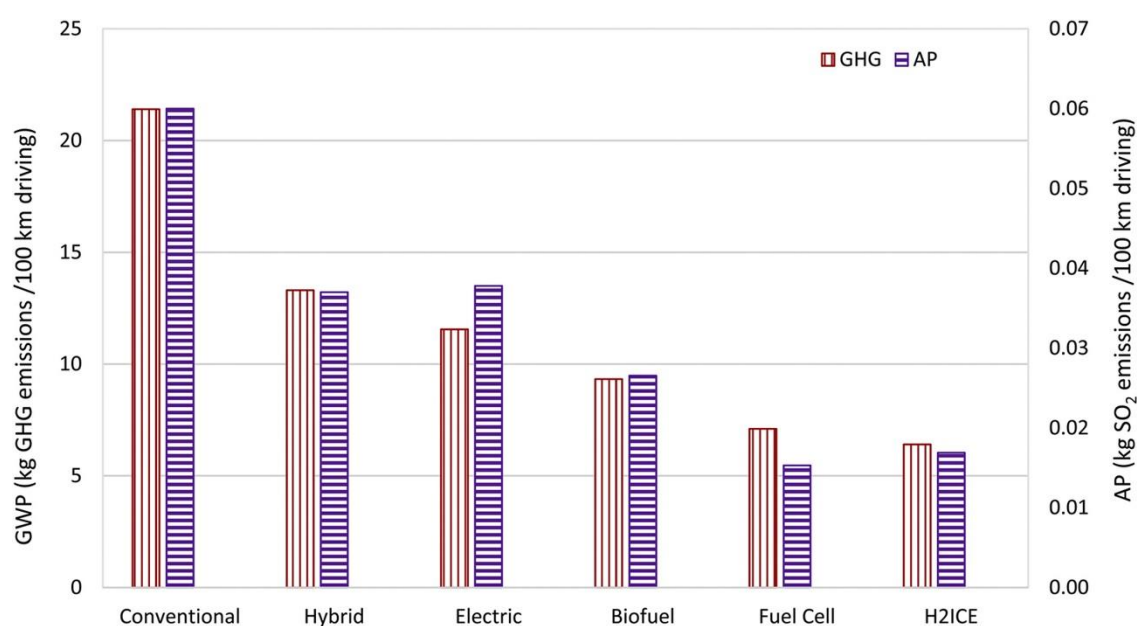


Figura 8 Confronto impatto ambientale tra le diverse tecnologie. Fonte: (Acar & Dincer, 2020)

Come si può notare i veicoli dotati di motore a combustione interna hanno i valori maggiori in entrambe le voci, invece i veicoli dotati di ICE funzionante a idrogeno riportano i valori di GWP minori rispetto alle altre tecnologie e i veicoli a fuel cell riportano i valori di AP più bassi.

Lo studio prosegue analizzando diversi fattori: efficienza energetica e dell'exergia, consumi di combustibile e/o energia elettrica, costo del combustibile e/o energia elettrica e autonomia. Il confronto fra le diverse tecnologie è stato eseguito tramite una normalizzazione che ha permesso di valutare tutti i parametri considerati con un numero compreso tra 0 e 10, dove un valore segnalato di 10 rappresenta il caso ideale.

Vengono proposti i valori nella tabella 1 e in un grafico visibile in figura 9 che mostra il posizionamento di ogni soluzione tecnologica rispetto al caso ideale.

Tabella 1 Tabella di confronto sull'impatto ambientale delle diverse tecnologie. Fonte: (Acar & Dincer, 2020)

	GHG	AP	SC- CO ₂	Energy	Exergy	Fuel Consumption	Fuel Price	Driving Range	Average
Conventional	0	0	0	2.73	2.05	0	0	4.91	1.21
Hybrid	3.79	3.83	3.79	3.53	2.96	4.19	4.18	10.00	4.53
Electric	4.60	3.70	4.60	3.74	3.20	7.16	6.94	0.00	4.24
Biofuel	5.64	5.58	5.64	3.44	2.72	4.88	5.82	4.19	4.74
Fuel Cell	6.68	7.45	6.68	3.99	3.71	4.53	4.25	2.49	4.97
H2ICE	7.01	7.18	7.01	3.61	2.90	4.22	4.15	2.43	4.81

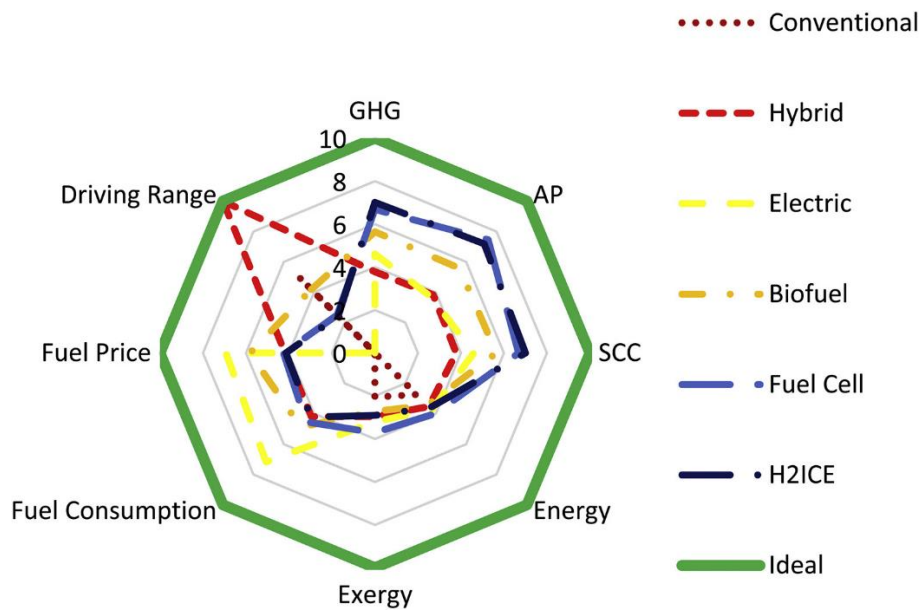


Figura 9 Grafico che mostra un confronto fra le diverse tecnologie. Fonte: (Acar & Dincer, 2020)

Analizzando i dati risulta evidente che tutte le alternative ai veicoli tradizionali risultano essere quasi sullo stesso piano, pur avendo dei punti di forza differenti; è necessario dunque investire su tutte le tecnologie e cercare di creare le giuste infrastrutture per consentire a tutte le alternative di essere adeguatamente sviluppate e renderle utilizzabili nel prossimo futuro per raggiungere un futuro sostenibile nel settore dei trasporti.

3. Perché i BEV

Attualmente tra tutte le possibili tecnologie mostrate nel capitolo precedente quella che è già riuscita a conquistare una fetta di mercato e che viene promossa maggiormente dalla Commissione Europea per la decarbonizzazione del settore dei trasporti è sicuramente quella dei veicoli elettrici; inoltre questa tipologia di veicoli sono stati anche il fulcro del progetto di questa tesi, di conseguenza in questo capitolo verranno approfonditi gli aspetti positivi e le sue criticità rispetto ai veicoli con motore a combustione interna.

3.1 Gli aspetti positivi

Uno degli aspetti principali per cui i veicoli a mobilità totalmente elettrica sono stati presi in considerazione per la rivoluzione verso una mobilità sostenibile è la guidabilità che un motore elettrico riesce a garantire; in particolare questi motori sono in grado di erogare la massima coppia alla partenza e mantenere questo valore di coppia fino a un determinato valore di velocità di rotazione del motore elettrico, detta base speed oltre la quale vi è poi una graduale riduzione della coppia mantenendo la potenza erogata costante. Vengono di seguito proposte le figure 10 e 11 che riportano le curve di coppia-velocità di rotazione, la prima per un tipico motore elettrico mentre la seconda per un motore ad accensione comandata.

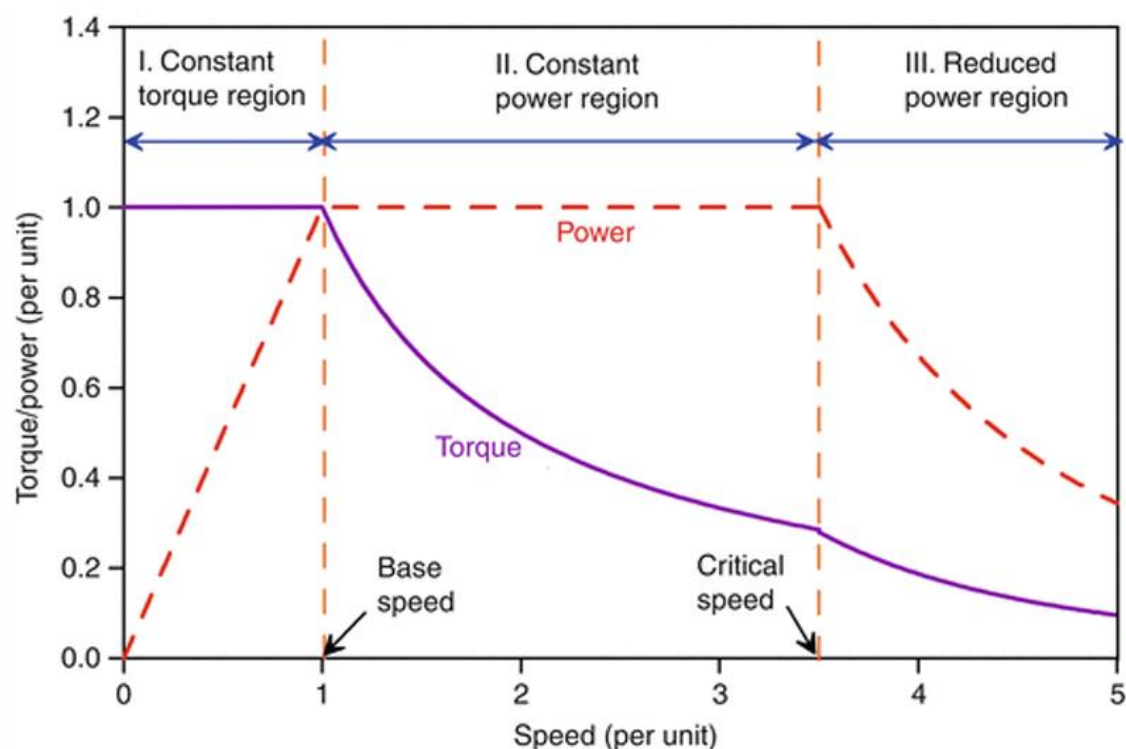


Figura 10 Andamento tipico di coppia di un motore elettrico. Fonte: (Prof. Vaschetto, 2025)

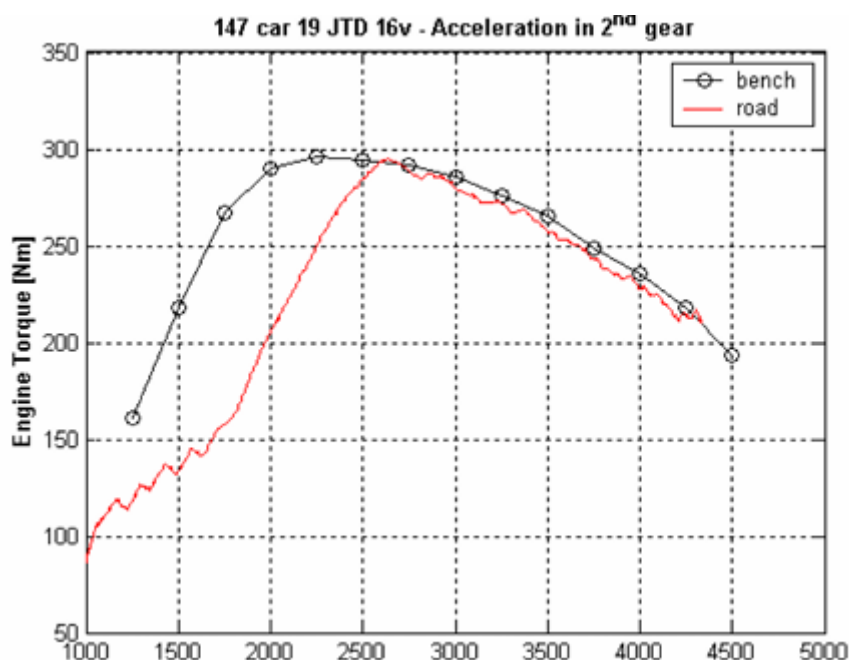


Figura 11 Andamento tipico di coppia di un motore ICE turbo. Fonte: (Prof. Millo, 2025)

Come si può notare dai due grafici la curva del motore elettrico garantisce un grande valore di coppia ai bassi regimi di rotazione risultando ideale per l'applicazione nel mondo automotive.

Un altro aspetto che è particolarmente positivo è l'efficienza dei motori elettrici; approssimativamente abbiamo visto che la percentuale di energia trasmessa all'albero motore per un veicolo ICE è circa il 30%, invece considerando le perdite in un powertrain elettrico possiamo stimare che il valore di energia che raggiunge le ruote sia del 70%, con una percentuale di perdite di circa il 20% e il restante quantitativo di energia utilizzato per l'attivazione degli ausiliari.

Inoltre il motore elettrico presenta diversi altri vantaggi, per esempio è in grado di accendersi autonomamente al contrario del motore a combustione interna che ha bisogno di un apporto iniziale di energia esterna; il motore elettrico è in grado di ruotare in entrambi i sensi di rotazione, caratteristica che associata alla curva che abbiamo visto di coppia e potenza rende il cambio un elemento non necessario, cosa che nei veicoli mossi da un motore tradizionale non è possibile.

Quest'ultimo punto contribuisce, insieme ad altri fattori, anche alla maggiore semplicità di costruzione caratteristica dei veicoli BEV rispetto agli ICE, questo si traduce anche in costi di manutenzione inferiori poiché vengono montati sul veicolo un numero minore di elementi che potenzialmente possono arrivare a rottura; inoltre il motore elettrico opera con rumorosità praticamente nulla e anche quasi in assenza di vibrazioni percepibili, a differenza della controparte a combustione interna. Infine i motori elettrici sono caratterizzati da una grande affidabilità e dall'assenza di emissioni allo scarico.

Tutte queste caratteristiche sono qualità che hanno incentivato lo sviluppo dei veicoli a trazione elettrica; tuttavia come ogni tecnologia non ha solo degli aspetti positivi ma presenta anche diverse criticità che ora andremo a esaminare.

3.2 Le criticità dei veicoli totalmente elettrici

La prima criticità di questi veicoli riguarda proprio la capacità di immagazzinare energia nelle batterie, statisticamente infatti la densità energetica per i pacchi batteria utilizzati nella trazione di veicoli ha valori compresi tra i 30 e i 100 Wh/kg, un valore decisamente modesto se paragonato a quello dei combustibili tradizionali che si attestano all'incirca a valori di 9000 Wh/kg. Questa stessa differenza è riscontrabile anche nella densità gravimetrica, quindi unendo le due caratteristiche si ottiene che i veicoli elettrici hanno autonomie molto ridotte rispetto ai veicoli tradizionali e risultano essere molto più pesanti. Per rendere più chiaro il confronto si ipotizzi di voler far percorrere al veicolo un tratto di 500 km senza necessità di effettuare un rifornimento o una ricarica; per un veicolo con motore a combustione interna saranno necessari all'incirca 37 l di combustibile e considerando l'ingombro del sistema di stoccaggio si può arrivare a circa 46 l totali corrispondenti a 43 kg circa. Ipotizzando invece di fare lo stesso con un veicolo BEV avremo bisogno di una capacità di 360 l della batteria, che unito al sistema di stoccaggio, comportano un ingombro di 670 l corrispondenti all'incirca a 830 kg. Come si può vedere il bilancio è nettamente a favore dei veicoli tradizionali.

La seconda criticità riguardante i veicoli BEV sono le infrastrutture e la modalità di ricarica; è possibile suddividere le tecnologie di ricarica in due macro famiglie:

- Ricarica di tipo conduttiva: i veicoli vengono connessi alla rete tramite un sistema di cablaggi;
- Ricarica di tipo convettiva: i veicoli vengono connessi alla rete senza l'utilizzo di cablaggi, in modalità "wireless".

In figura 12 viene mostrato schematicamente come avviene la connessione tra il veicolo e la rete elettrica se si utilizza la ricarica di tipo conduttiva.

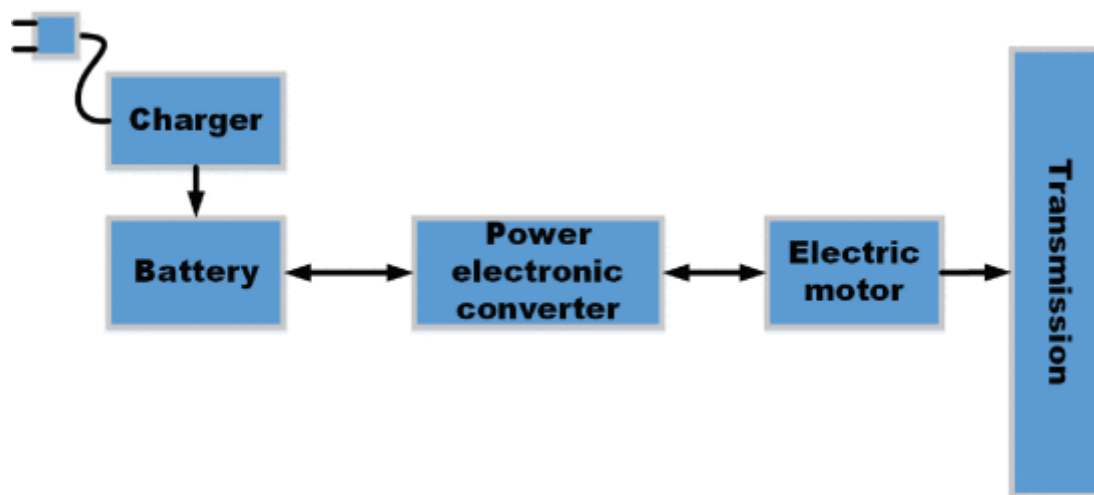


Figura 12 Schema di connessione alla rete elettrica di un powertrain elettrico. Fonte: (Ehsani, Veer Singh, Om Bansal, & Mehrjadi, 2021)

La ricarica di tipo conduttiva permette, in base alle proprietà degli elementi utilizzati di fornire una potenza differente; è importante notare che non tutti i veicoli sono adatti a ricevere tutte le potenze erogabili. In tabella viene proposto un riassunto dei diversi livelli di potenza che si riescono a condurre tramite questa tecnologia.

Tabella 2 Confronto tra le diverse potenze di ricarica conduttiva. Fonte: (Prof. Vaschetto, 2025)

Power level	Positioning	Use	Supply equipment	Power	Recharge time	Type of vehicle
Level 1 120Vrms USA 230Vrms EU	Onboard single phase	Home/Office recharge	Standard sockets	< 2 kW	4-11 hours 11-36 hours	Hybrid (5-15 kWh) Electric (16-50 kWh)
Level 2 240Vrms USA 400Vrms EU	Onboard Single-phase/ three-phase	Public/private recharge points	Dedicated EVSE	4 kW 8 kW 23 kW	1-4 hours 2-6 hours 2-3 hours	Hybrid (5-15 kWh) Electric (16-50 kWh) Electric (3-50 kWh)
Level 3 (Fast) 208-600V AC or DC	Off-board Three-phase	Charging station	Dedicated EVSE	50 kW >100 kW	0.4-1 hours 0.2-0.5 hours	Electric (20-50 kWh)

I sistemi di ricarica e la dotazione dei veicoli elettrici è normato dalle istituzioni internazionali e vengono previste diverse modalità con cui i veicoli elettrici possono essere ricaricati. Di seguito ne viene presentato un breve riassunto:

- La modalità 1 viene normata dalla normativa EN 61851-1 e prevede la possibilità di ricaricare il veicolo elettrico in un contesto domestico caratterizzato da un basso costo e facilità di utilizzo; la ricarica avviene tramite una corrente in singola fase con un valore quadratico medio fino a 16 A_{rms} . Inoltre questo sistema prevede solo la presenza di fusibili per evitare eventi di sovracorrenti e la presenza di un relè differenziale. Questa modalità di ricarica non è permessa negli Stati Uniti e in Regno Unito.
- La modalità di tipo 2 permette invece di ricaricare fino a un valore quadratico medio di 32 A_{rms} e 250 V_{rms} oppure fino a 480 V_{rms} in base a se si sta utilizzando un connettore che permetta di utilizzare la corrente in singola fase (primo caso) o in trifase. Viene previsto uno scambio di dati con la rete e sono necessari dei sistemi di sicurezza specifici tra il punto di connessione del veicolo e la rete stessa; tipicamente questi sistemi di sicurezza sono inclusi nel cavo di ricarica. In Italia questa modalità di ricarica è consentita solo per un utilizzo privato mentre è vietata per le infrastrutture pubbliche, anche in diversi altri Paesi questa modalità di ricarica è soggetta a delle restrizioni;
- La modalità di tipo 3 richiede che la presenza di un trasformatore elettrico permanentemente collegato alla rete elettrica per ricaricare il veicolo (infrastruttura EVSE); con questa modalità di ricarica si permette di utilizzare la corrente di tipo AC trifase. Come per la modalità precedente avviene uno scambio di dati per controllare in maniera efficace la ricarica del veicolo, in particolare si deve assicurare che vi sia la corretta connessione alla rete elettrica e trasmettere la massima corrente di ricarica. Questa modalità di ricarica è l'unica permessa in Italia per le infrastrutture pubbliche che consentono la ricarica tramite corrente alternata.
- La modalità di tipo 4 richiede una EVSE dedicata che consenta di ricaricare il veicolo con la corrente continua DC; come per la modalità di tipo 3 avviene uno scambio di dati per controllare gli stessi parametri assicurandosi che non vi siano anomalie durante la ricarica. È la modalità utilizzata per avere le ricariche più veloci possibili con la ricarica conduttiva.

In figura 13 viene mostrato uno schema che aiuta a comprendere le differenze tra le quattro modalità di ricarica.

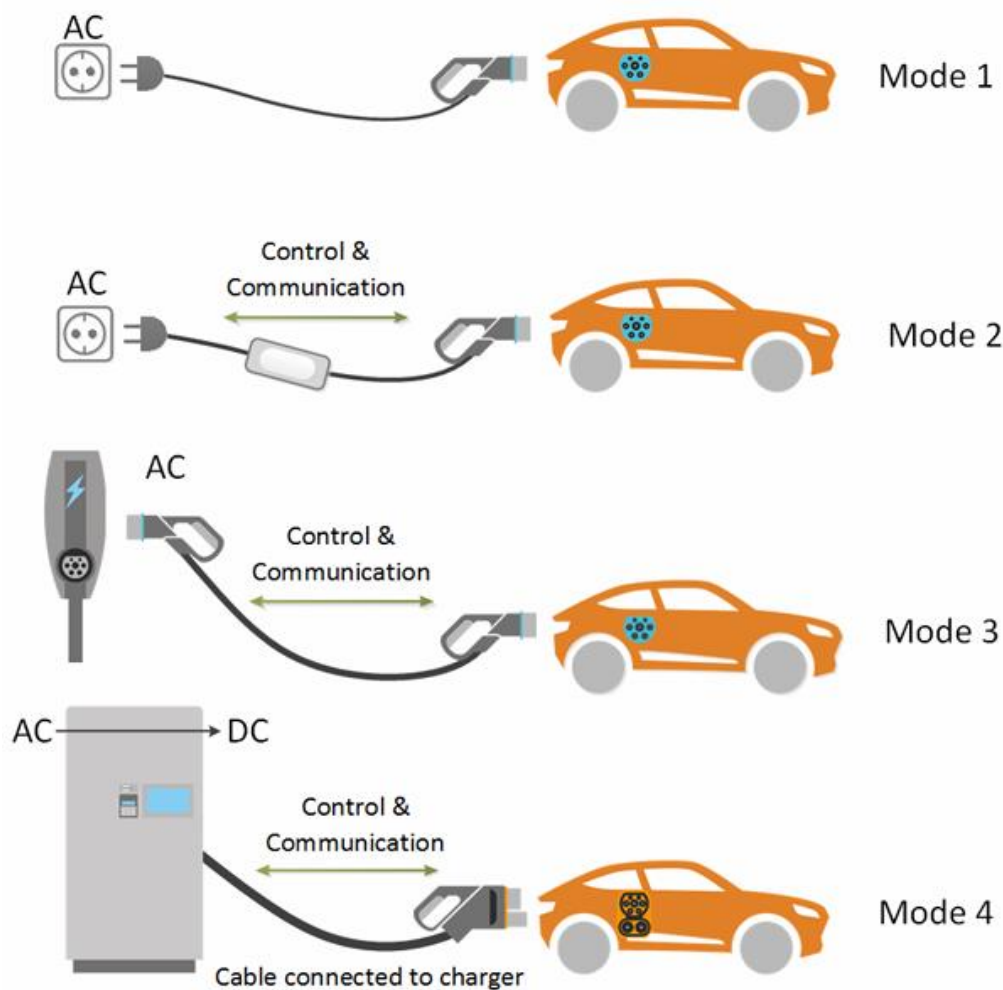


Figura 13 Rappresentazione schematica delle diverse infrastrutture di ricarica connettiva. Fonte: (Prof. Vaschetto, 2025)

Attualmente nell'Unione Europea tutte le infrastrutture consentono unicamente la ricarica di tipo conduttiva poiché è una tecnologia decisamente più conosciuta anche in ambiti diversi da quello automotive; tuttavia sono diversi i progetti e gli studi che stanno sviluppando la tecnologia wireless.

Il motivo per cui si stanno cercando delle alternative alla ricarica di tipo conduttiva è che i tempi di ricarica per una batteria sono decisamente superiori rispetto a quanto necessario per fare rifornimento a un veicolo tradizionale e quindi un aumento drastico dei veicoli BEV introdotti nel mercato richiederebbe anche un aumento marcato delle infrastrutture di ricarica e questo potrebbe portare a diversi problemi soprattutto nelle grandi città.

La ricarica del veicolo è un momento cruciale per la durata della vita del pacco batteria e può avere un impatto anche sulle performance del veicolo. È importante quindi andare a definire il profilo di ricarica ottimale con cui si può ricaricare il pacco batteria senza che si verifichino danni sul lungo periodo allo stesso; i parametri che influenzano il profilo di ricarica sono il tempo di ricarica e la qualità della corrente che viene utilizzata, in particolare è importante che non vi siano fluttuazioni di corrente.

Il profilo di ricarica può essere di due tipi:

- Tensione costante (CV);
- Corrente costante (CC).

Il profilo di ricarica a tensione costante è caratterizzato dall'inviare alla batteria una tensione leggermente superiore rispetto a quella nominale; nel caso in cui lo stato di carica della batteria sia molto basso questo può creare uno stato di sovracorrente nella batteria rischiando di ridurre la vita utile del pacco batteria.

La ricarica a corrente costante invece prevede l'invio alla batteria di una corrente in valore costante tenuta sotto controllo da un dispositivo dedicato; è un metodo di ricarica che rischia di danneggiare meno il pacco batteria rispetto al CV, tuttavia bisogna evitare di lasciare il veicolo in carica quando è totalmente carico perché livelli elevati di corrente rischiano di danneggiare la batteria.

Tipicamente si utilizzano entrambi i profili di ricarica per avere il profilo ottimale, utilizzando il profilo CC nella parte iniziale di ricarica per poi passare al CV, terminando con una corrente che si riduce a un valore di circa il 5% rispetto al valore di ricarica in CC quando la batteria si è caricata completamente. In figura 14 viene mostrato questo andamento.

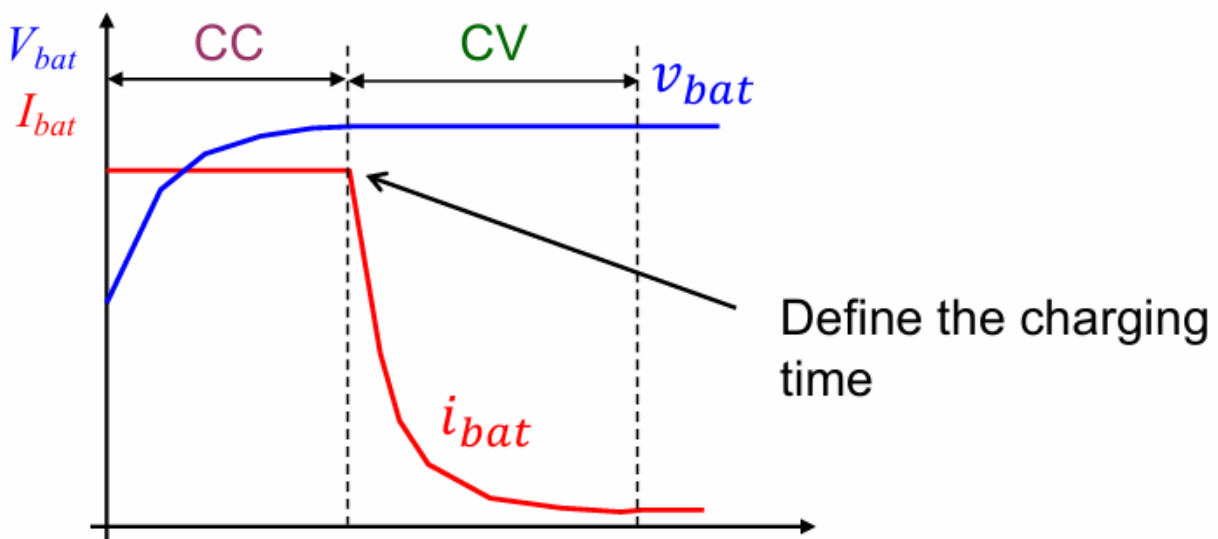


Figura 14 Profilo di ricarica ideale. Fonte: (Prof. Vaschetto, 2025)

L'ultima grande criticità legata ai veicoli a trazione puramente elettrica è legata alla reperibilità dei materiali per la produzione delle batterie e la produzione stessa; viene mostrato il grafico in figura 15 di come è aumentata nel tempo la richiesta di batterie nel settore automotive e nelle diverse regioni geografiche.

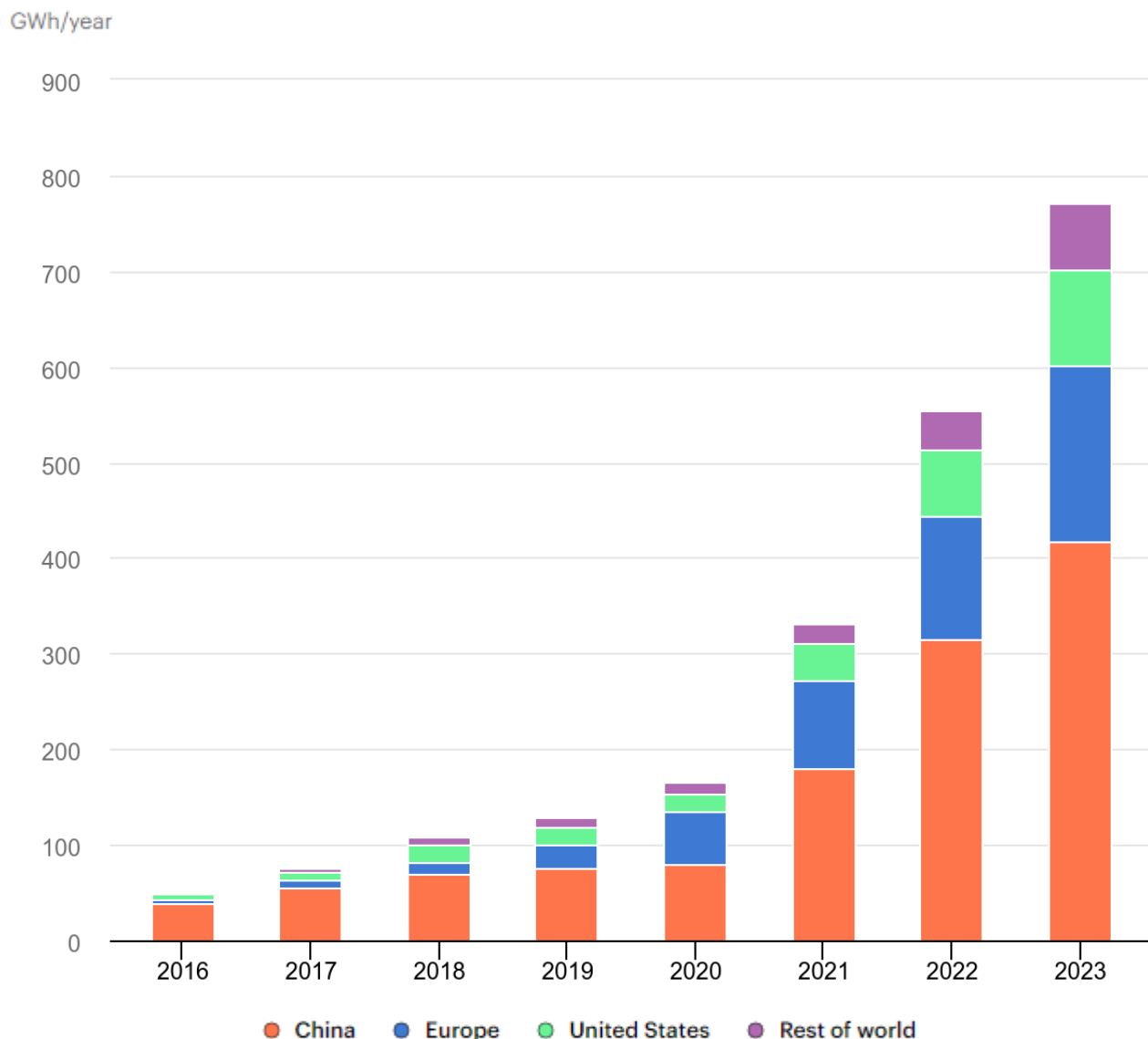


Figura 15 Andamento della richiesta di energia elettrica per la trazione di veicoli. Fonte: (IEA, Global EV Outlook, 2024)

Come si può notare l'aumento della richiesta è stata significativa, tuttavia le aree geografiche in cui vi è disponibilità di materiali e in cui avviene la produzione delle batterie è molto limitata, come si può notare dal grafico di figura 16.

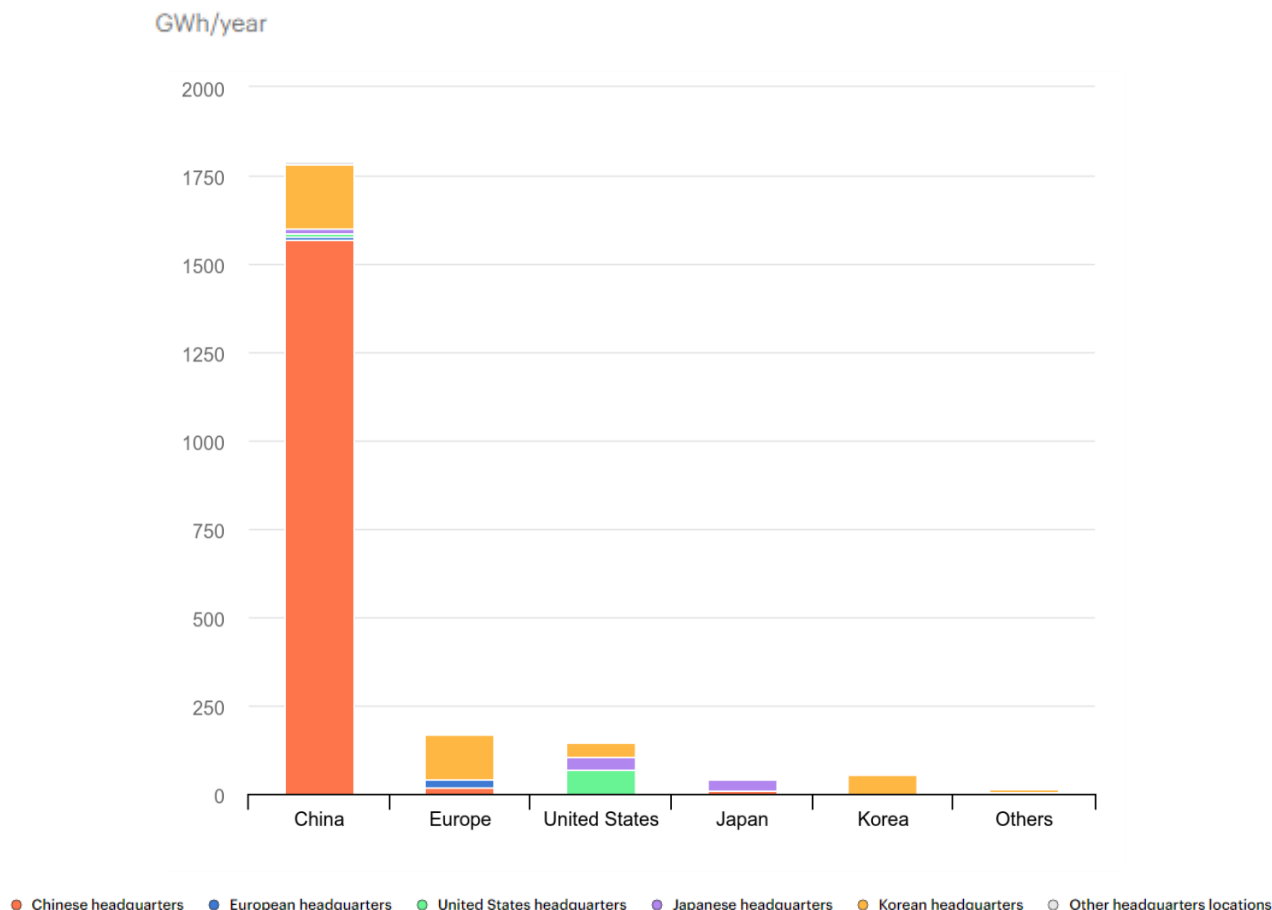


Figura 16 Provenienza delle batterie per trazione di veicoli nel mondo. Fonte: (IEA, Global EV Outlook, 2024)

Come si può notare analizzando il grafico di figura 16, il numero dei paesi in grado di produrre batterie è molto limitato; per esempio in Europa nel 2023 il 75% della capacità produttiva di batterie dipende dalla Corea del Sud, nonostante la capacità produttiva sul territorio sia aumentata del 25% circa. La capacità di produzione in un'area molto ristretta può portare a diverse problematiche e tensioni, oltre al fatto che all'aumentare della richiesta vi è un conseguente aumento del prezzo dei materiali, infatti questa tendenza è visibile in figura 17.

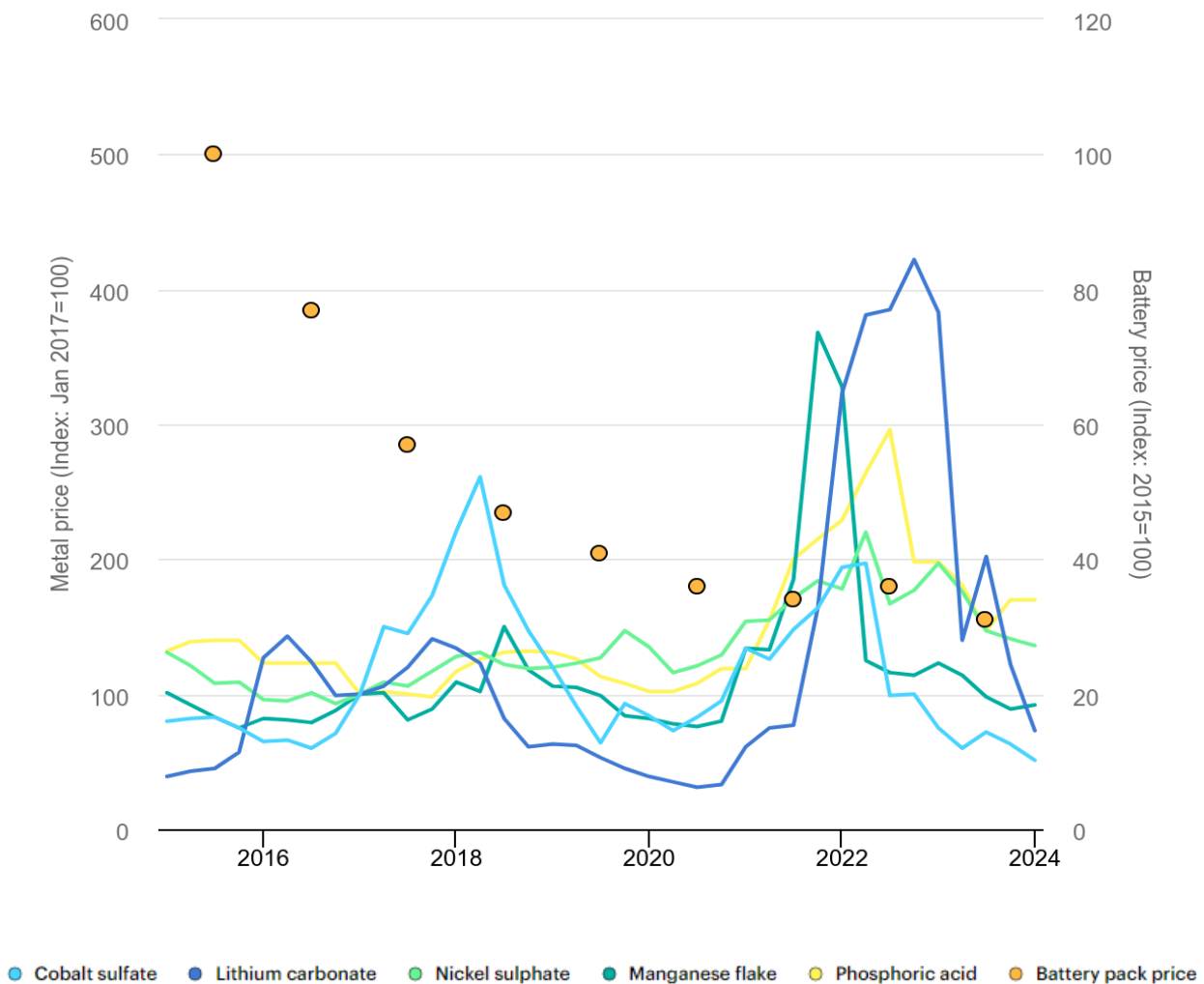


Figura 17 Andamento del costo dei materiali per la produzione di batterie nel tempo. Fonte: (IEA, Global EV Outlook, 2024)

Come si può vedere dal grafico il costo dei singoli materiali è aumentato nel tempo mentre la produzione dell'intero pacco batterie è diminuito nel tempo essendo aumentata la produzione e le competenze dei costruttori; risulta quindi evidente come essere in un'area in cui vi sia una grande disponibilità di questi materiali sia molto importante e vi sia la concreta possibilità di trovarsi con molti paesi che dipendano dalla produzione di una cerchia ristretta di paesi produttori (IEA, Global EV Outlook, 2024).

3.3 I BEV contribuiscono realmente ad abbattere le emissioni?

Nel capitolo precedente è stata mostrata una rapida comparativa tra le diverse tecnologie attualmente in sviluppo per la riduzione delle emissioni di inquinanti; tuttavia il caso dei veicoli BEV è molto più complesso poiché il loro impatto a livello di emissioni dipende da diversi fattori.

Analizzando infatti solamente le emissioni in uscita allo scarico del veicolo si può dire che ci si trova in presenza di un veicolo a emissioni zero; tuttavia ampliando l'analisi si deve tenere conto di come viene prodotta l'energia che viene utilizzata dal veicolo, dal costo ambientale per la produzione del veicolo stesso e infine dalle “emissioni nascoste” che si hanno quando il veicolo viaggia su strada. In questo paragrafo viene eseguita un'analisi più approfondita prendendo in considerazione diversi contesti per cercare di determinare se l'utilizzo di veicoli BEV porti sempre riduzione delle emissioni rispetto ai veicoli con motore a combustione interna oppure in quali contesti è più corretto utilizzarli.

Prima di analizzare l'impatto a livello di emissioni per la produzione di energia elettrica in diverse parti del mondo e come questo influisce sull'impatto ambientale nell'utilizzo dei BEV, si vuole dare una prospettiva anche sulle emissioni “non tailpipe”, che tipicamente sono collegate a 3 elementi: l'usura dei freni, l'usura degli pneumatici e del manto stradale, sollevamento delle polveri stradali (Beddows & Harrison, 2021).

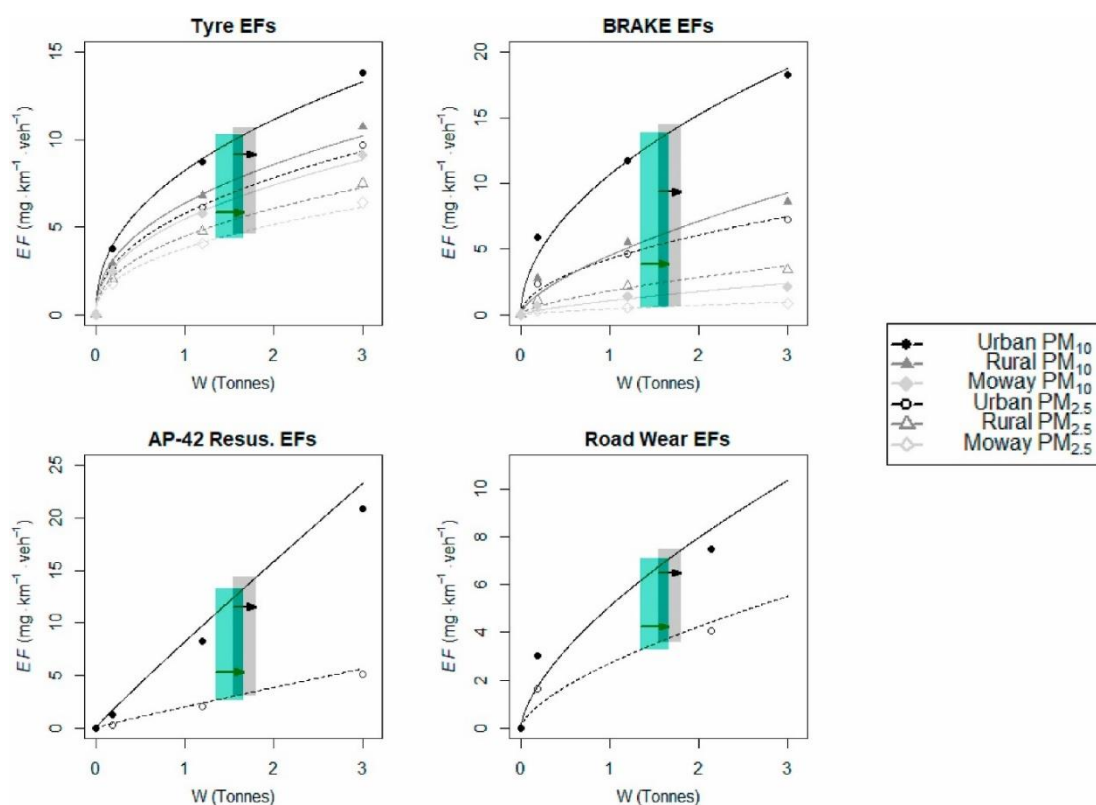


Figura 18 Emissioni non tailpipe dei veicoli a trazione elettrica. Fonte: (Beddows & Harrison, 2021)

Per valutare l'impatto di queste emissioni lo studio condotto da D.Beddows ha utilizzato i fattori di conversione pubblicati nell'emission inventory guidebook del 2013 pubblicato da EMEP/EEA e il

peso dei veicoli. I risultati sono visibili in figura 18, tenendo in considerazione che i rettangoli verdi rappresentano i valori per i veicoli ICE mentre quelli grigi rappresentano i risultati dopo la conversione in veicoli BEV.

Viene mostrato anche la variazione del fattore di conversione tra un veicolo ICE e un veicolo BEV, in particolare i grafici mostrano la variazione assoluta passando da un veicolo ICE a uno puramente elettrico.

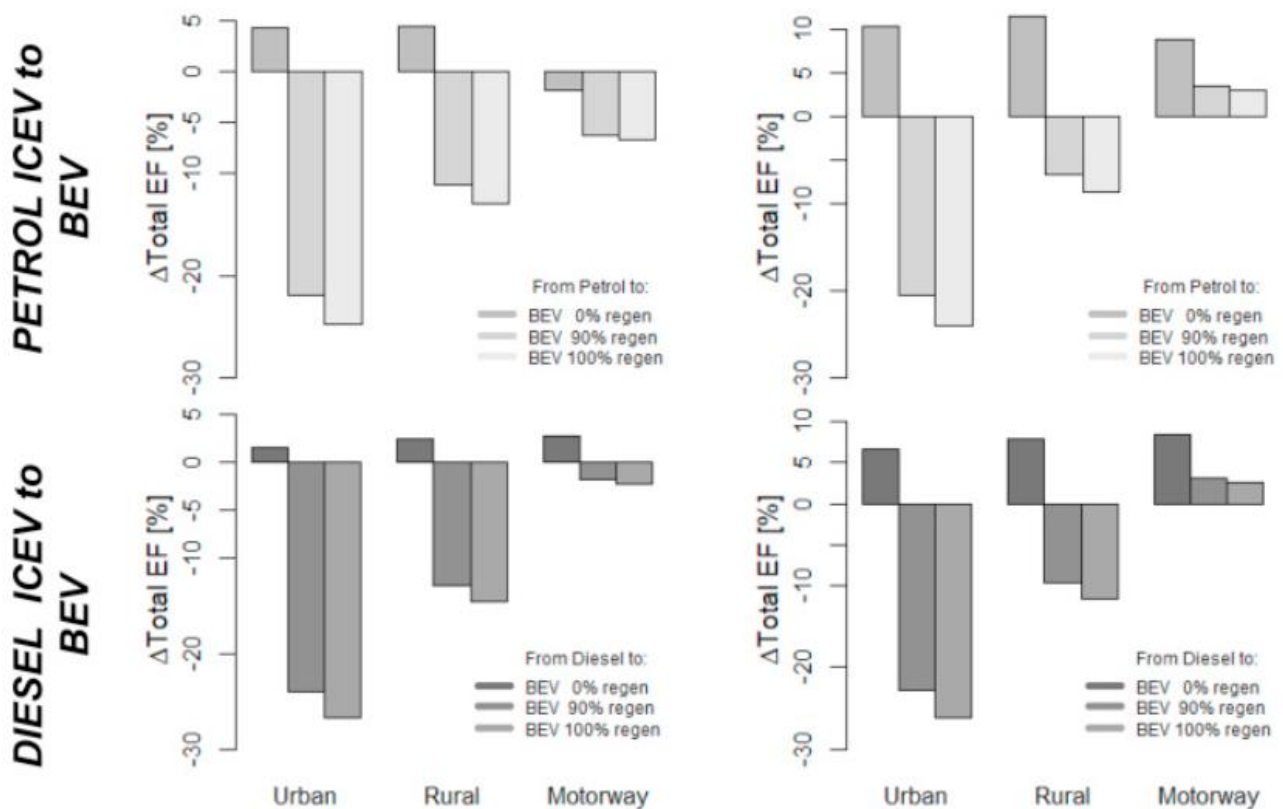


Figura 19 Impatto ambientale convertendo un veicolo ICE in un BEV. Fonte: (Beddows & Harrison, 2021)

Sebbene i dati siano ancora incerti e vadano ulteriormente approfonditi per ottenere risultati più concreti, da una prima analisi si può vedere che la riduzione di emissioni di particolato per un veicolo BEV è tangibile solo nel caso in cui il veicolo sia progettato per avere un'intensa frenata rigenerativa, altrimenti si avrà addirittura un risultato peggiore a causa del maggiore peso medio dei veicoli BEV.

Secondo un report fornito dall'EEA, basandosi sul mix energetico presente in Unione Europea nel 2015 si può stimare che le emissioni di un veicolo BEV di medie dimensioni siano comprese tra i 60 e i 76 gCO₂/km, che in quel periodo rappresentava una riduzione abbastanza significativa di emissioni rispetto ai veicoli ICE, tuttavia questo tipo di analisi non tiene conto dell'eventuale utilizzo di combustibili alternativi. In figura 20 viene mostrato il grafico che confronta le emissioni tra veicoli BEV, veicoli range-extender, veicoli ibridi plug-in e veicoli tradizionali (EEA, 2018).

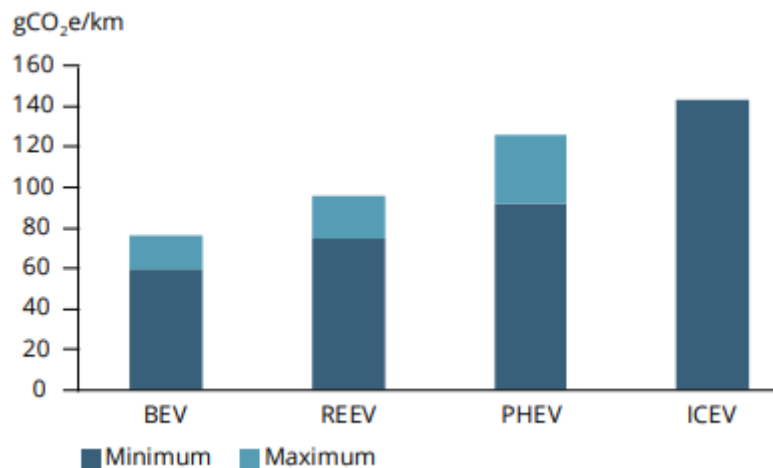


Figura 20 Report dell'EEA sulle emissioni di CO₂ al km per diverse tecnologie. Fonte: (EEA, 2018)

Dove:

- REEV sono i veicoli range-extender;
- PHEV sono i veicoli ibridi plug-in.

Adesso si vogliono approfondire tre studi differenti che hanno preso in considerazione contesti molto differenti: il primo è uno studio basato sull'analisi dei dati in Italia, il secondo sull'analisi dei dati in Norvegia - che è un mercato molto più pronto rispetto a quello italiano per integrare un maggior numero di veicoli BEV - e infine si propone uno studio basato sull'analisi dei dati in India.

Partendo dallo studio di Francesca M. Grimaldi e Pietro Capaldi (Grimaldi & Capaldi, 2024) si fa un'analisi sull'efficacia di sostituire totalmente i veicoli ibridi (sia mild che full) a favore di veicoli elettrici. Questo studio è particolarmente importante visto che ad oggi la quasi totalità di veicoli ICE introdotti sul mercato italiano presentano almeno una forma di ibridizzazione leggera. I veicoli sono stati scelti in modo da rappresentare l'85% del mercato italiano e tutti i gruppi di propulsione utilizzati sono stati individuati come "Best in Class" per efficienza.

L'analisi è stata eseguita ipotizzando due diversi contesti che cercano di prevedere quanto l'industria europea riuscirà a raggiungere gli obiettivi di decarbonizzazione prefissati, uno più conservativo denominato BAU@2035 e un secondo più aggressivo denominato FF55@2035; in prima battuta viene mostrato un grafico che mostra la proiezione delle emissioni per i veicoli in 4 segmenti diversi nel periodo compreso tra il 2022 e il 2034.

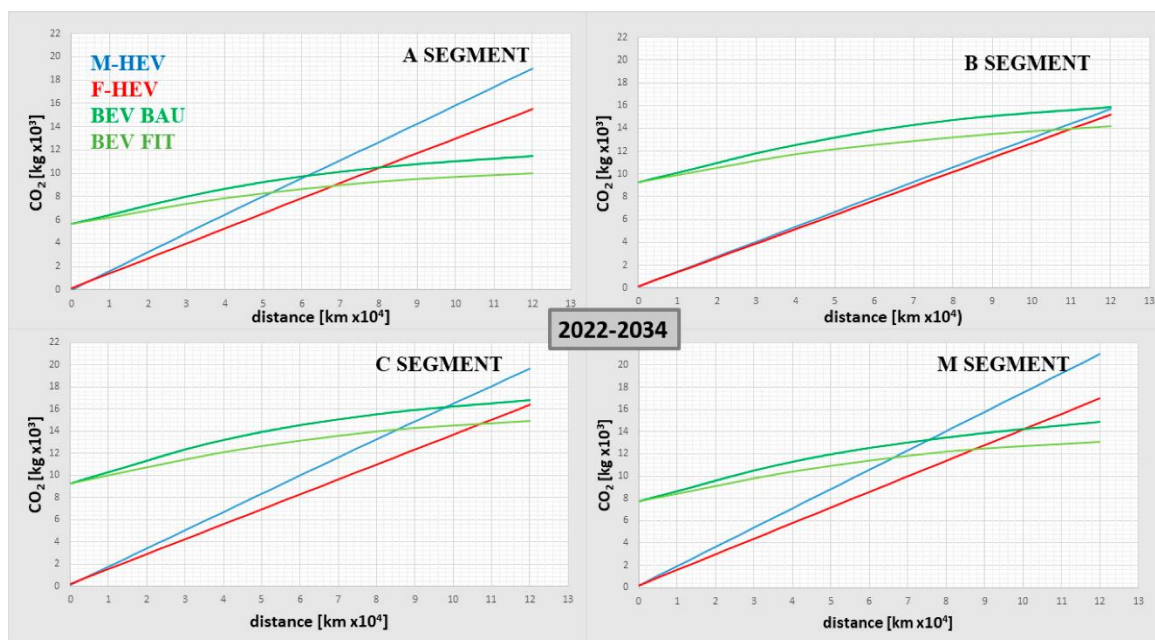


Figura 21 Confronto emissioni tra BEV, M-HEV, F-HEV di diversi segmenti con previsione 2022-2034. Fonte: (Grimaldi & Capaldi, 2024)

Per i veicoli BEV sono mostrate entrambe le curve in base allo scenario considerato; l'intersezione tra le curve blu o rosse e quelle verdi rappresentano la distanza da percorrere prima che le emissioni aggiuntive per la produzione di veicoli elettrici sia pareggiata. Si può notare come per l'attuale mix energetico presente in Italia il segmento di veicoli che maggiormente beneficerebbe di una sostituzione con veicoli BEV è il segmento A, seguito dal segmento M; il segmento C presenta dei benefici parziali se si considerano veicoli mild hybrid mentre quasi nulli considerando veicoli full hybrid. Infine per il segmento B l'intersezione viene raggiunta dopo una distanza percorsa di 120000 km anche considerando dei veicoli mild hybrid. In ogni caso l'intersezione delle curve avviene dopo una distanza percorsa non trascurabile.

Lo studio prosegue cercando di prevedere realisticamente il periodo di tempo tra il 2035 e il 2047; vengono mantenuti i due scenari precedentemente esposti e l'analisi è stata fatta ipotizzando una riduzione di consumi tra il 5% e il 10% per i veicoli dotati di motore ICE e un miglioramento dell'efficienza del 5% per i veicoli BEV, visto già l'elevato grado di efficienza raggiunto da questi ultimi e difficilmente migliorabile; inoltre si è ipotizzato che le batterie avranno una densità energetica del 20% superiore.

I risultati ottenuti sono visibili nelle figure 22 e 23.

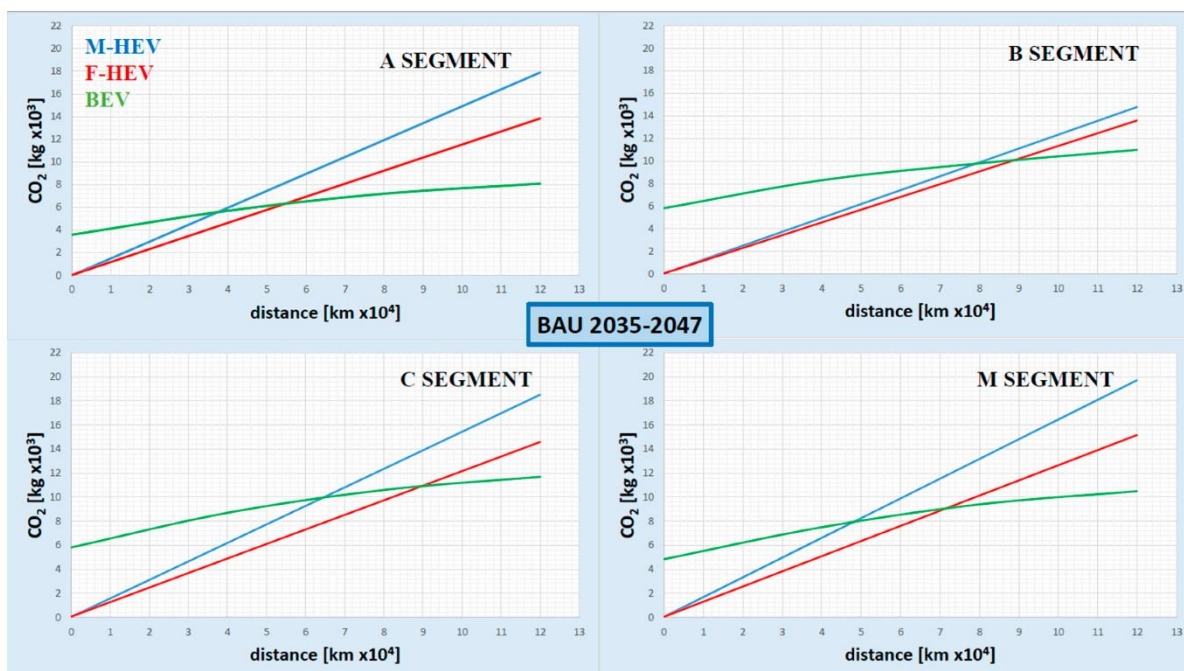


Figura 22 Confronto emissioni tra BEV, M-HEV, F-HEV di diversi segmenti con previsione BAU 2035-2047. Fonte: (Grimaldi & Capaldi, 2024)

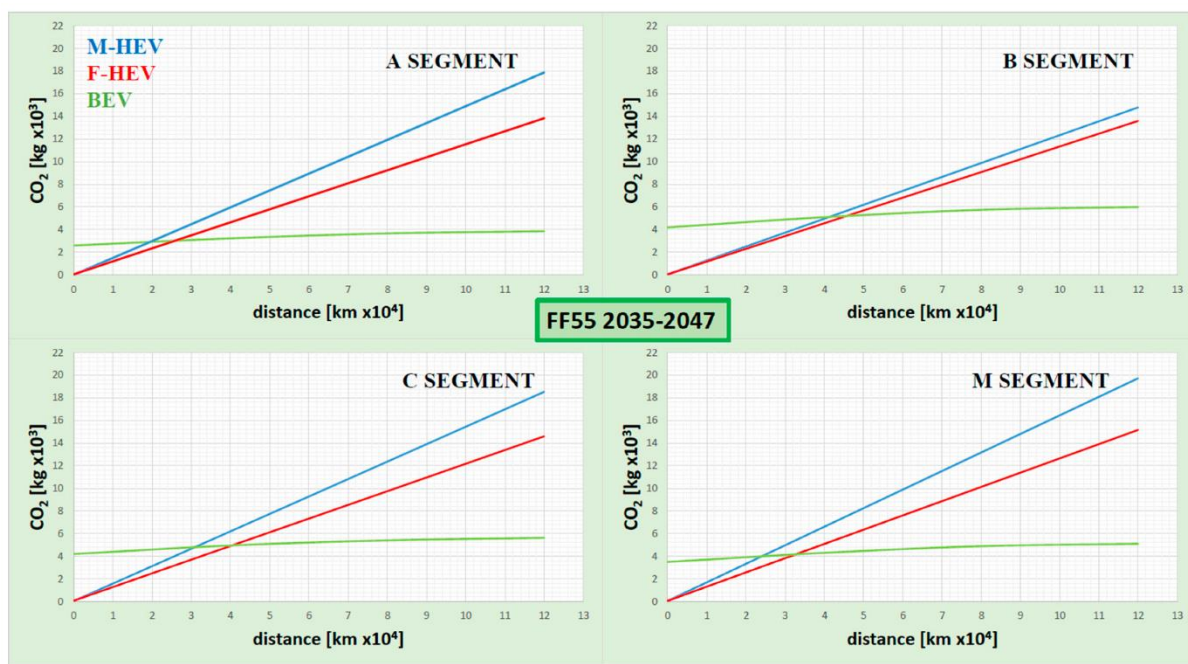


Figura 23 Confronto emissioni tra BEV, M-HEV, F-HEV di diversi segmenti con previsione FF55 2035-2047. Fonte: (Grimaldi & Capaldi, 2024)

Analizzando i grafici riportati si può vedere che si hanno vantaggi significativi solo nel caso in cui ci si trovi nel contesto “Fit for 55” in tutti i segmenti considerati; invece considerando lo scenario BAU i risultati sono sicuramente migliori rispetto a quelli ottenuti nel periodo di tempo 2022-2034, tuttavia potrebbe non essere sufficiente per avere un reale impatto sulle emissioni di CO_2 se non dopo distanze percorse significative. Inoltre lo studio ha evidenziato che presumibilmente l’Italia si ritroverà in una situazione intermedia tra lo scenario ipotizzato BAU e quello FF55, di conseguenza la transizione a veicoli completamente elettrici può portare a dei benefici ma deve essere eseguita con molta attenzione.

Dopo aver analizzato il contesto italiano si vuole analizzare invece il contesto norvegese, analizzando il lavoro pubblicato da Yang Anni (Yang, Liu, Yang, & Lu, 2023).

Il mercato norvegese per i veicoli elettrici è uno dei più floridi in Unione Europea, infatti nel 2021 la quota di veicoli BEV nel mercato norvegese ha raggiunto il 64,5%, decisamente superiore rispetto sia alla media europea sia rispetto a quella mondiale.

Le ragioni per cui in questo contesto i veicoli a batteria abbiano avuto un tale successo sono diverse, tra queste vi è di sicuro che la Norvegia è uno dei paesi con la produzione di energia più ecosostenibile dell’Unione Europea, con una produzione di energia dipendente da combustibili fossili del solo 1,1%.

In figura 24 è visibile un confronto tra le emissioni di un veicolo funzionante a benzina e dei veicoli BEV considerando la distanza che sono in grado di percorrere con una sola carica.

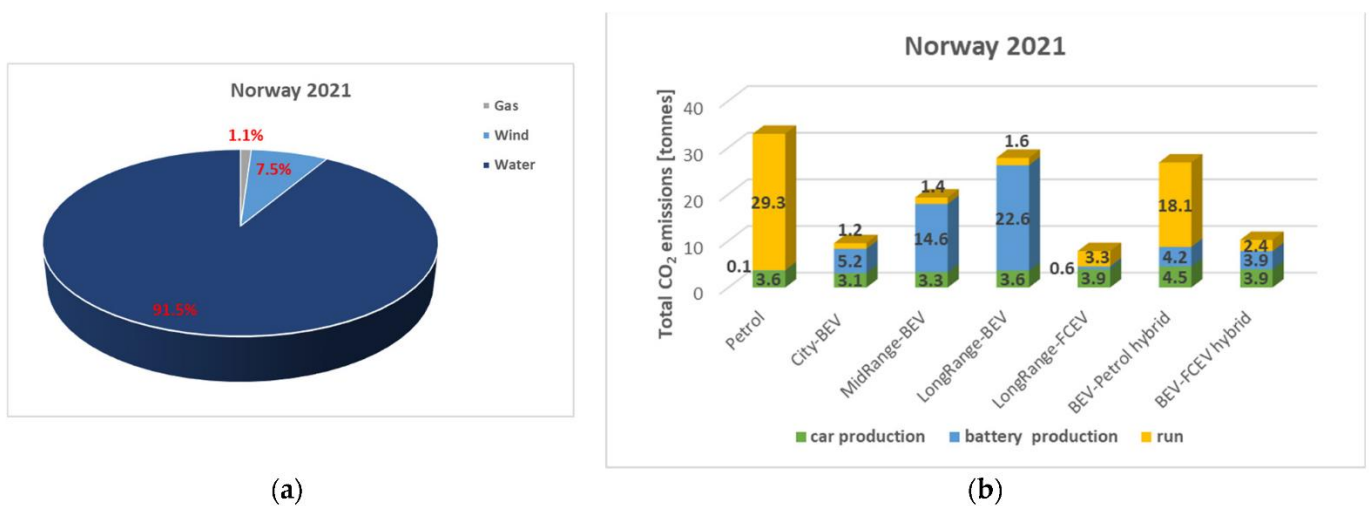


Figura 24 Fonti per la produzione dell’energia elettrica in Norvegia (a) Emissioni totali di CO_2 tra diversi tipi di veicoli (b).
Fonte: (Yang, Liu, Yang, & Lu, 2023)

Sulla sinistra si può vedere un grafico che mostra la produzione di energia in Norvegia mentre a destra il confronto già citato. Come si può notare le emissioni minime si ottengono con i veicoli Long-range seguiti subito dopo da veicoli city-BEV, verosimilmente grazie alla dimensione del pacco batteria che comporta un minor impatto ambientale rispetto agli altri veicoli BEV e infine i veicoli full hybrid. In ogni caso tutti i veicoli risultano avere delle emissioni totali inferiori rispetto al veicolo ICE.

Questi valori di emissioni sono stati ottenuti dallo studio ipotizzando una vita utile del veicolo di 200.000 km.

È evidente dunque che in un contesto del genere i veicoli puramente elettrici siano in grado di offrire un reale abbassamento delle emissioni rispetto a quelli tradizionali, soprattutto se si integrano con i veicoli full hybrid o Long-range, per coprire tutte le esigenze del settore dei trasporti leggeri.

Infine viene proposto uno studio sulla situazione in India condotto da Nandola Yash (Nandola, Krishna, Pramanik, Himabindu, & Ravikrishna, 2025), per avere una panoramica completa su contesti molto diversi a livello di mix energetico disponibile, visibile nel grafico proposto nella figura 25.

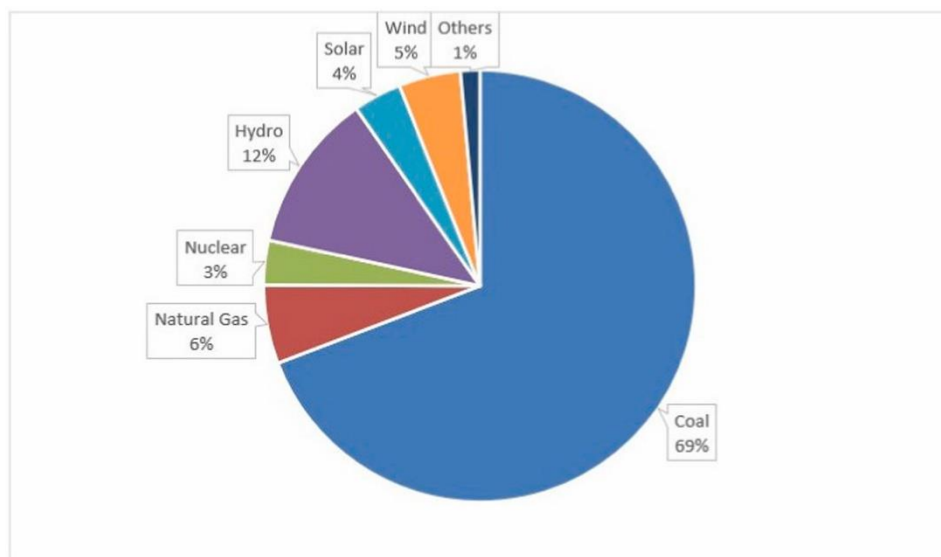


Figura 25 Fonti utilizzate per la produzione di energia elettrica in India. Fonte: (Nandola, Krishna, Pramanik, Himabindu, & Ravikrishna, 2025)

Lo studio condotto da Y. Nandola et al. prende in considerazione solamente i veicoli a due ruote poiché questo tipo di veicoli sono particolarmente diffusi nella regione considerata.

Lo studio propone un'analisi WTW, di cui verranno esposti i risultati coi grafici seguenti e verranno analizzati brevemente.

Il primo passo da eseguire è l'analisi delle emissioni per la lavorazione dei combustibili tradizionali e il processo di produzione dell'energia; in figura si possono vedere i risultati.

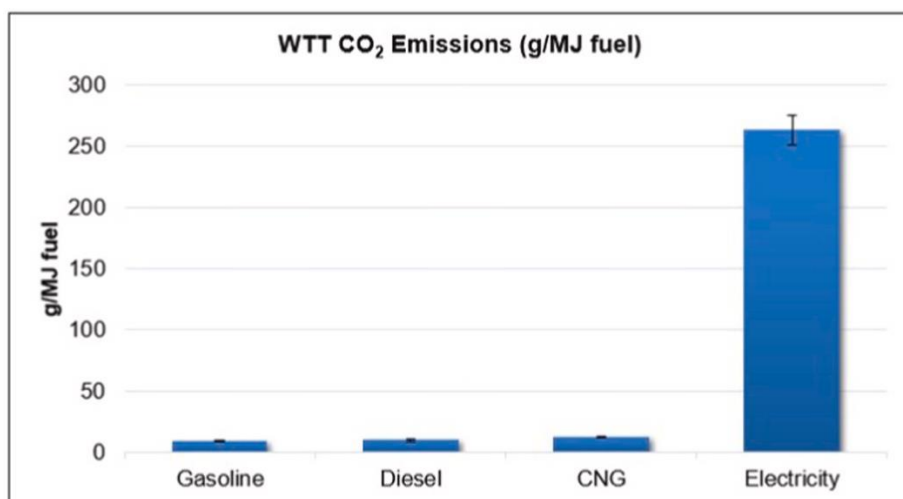


Figura 26 Emissioni di CO₂ per la produzione dei diversi combustibili e dell'energia elettrica. Fonte: (Nandola, Krishna, Pramanik, Himabindu, & Ravikrishna, 2025)

Come si può notare la produzione di energia elettrica, essendo fortemente dipendente dal carbone mostra livelli di emissioni di CO₂ decisamente superiori rispetto ai combustibili tradizionali.

Il secondo passo da esaminare sono le emissioni “tailpipe” dei veicoli; i risultati sono visibili in figura 27.

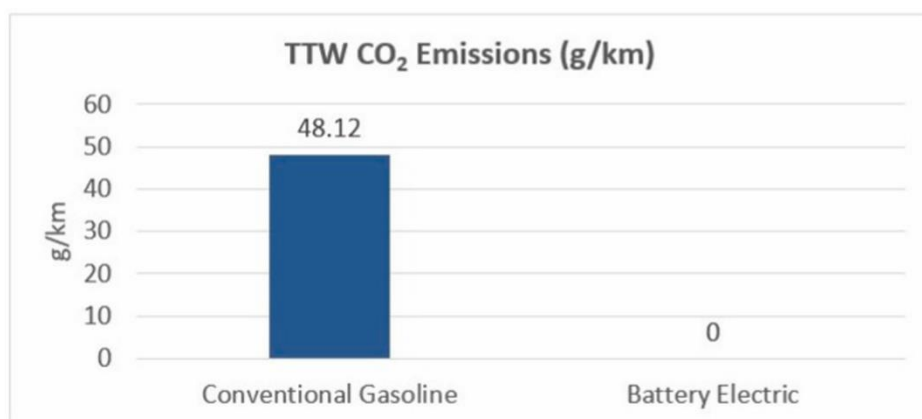


Figura 27 Emissioni tailpipe dei veicoli considerati. Fonte: (Nandola, Krishna, Pramanik, Himabindu, & Ravikrishna, 2025)

Ovviamente le emissioni per quanto riguarda i BEV sono pari a 0, mentre per i veicoli a benzina sono pari a 48.12 g/km, un valore non molto buono considerando che si parla di veicoli a due ruote.

Infine vengono uniti i due risultati per ottenere l'analisi WTW, i cui risultati sono visibili in figura 28.

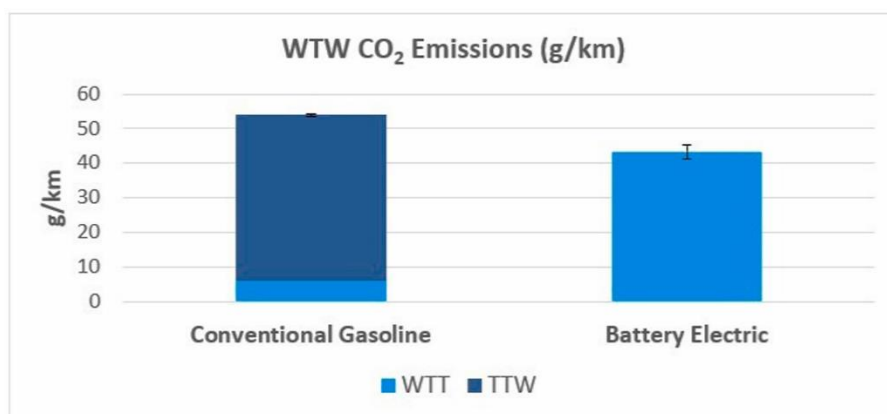


Figura 28 WTW dei veicoli considerati in India. Fonte: (Nandola, Krishna, Pramanik, Himabindu, & Ravikrishna, 2025)

Come si può notare, dai risultati complessivi dell'analisi well-to-wheel i valori di emissioni ottenuti per i veicoli BEV sono leggermente inferiori rispetto ai veicoli tradizionali. Oltre a questi risultati bisogna anche tenere in considerazione che i materiali per la costruzione dei veicoli puramente elettrici in questa regione sono particolarmente rari rendendo difficile la loro costruzione.

Alla luce di quanto analizzato si può concludere che tendenzialmente la sostituzione di veicoli ICE con quelli puramente a trazione elettrica comporta una riduzione in termini di emissioni di inquinanti lungo la vita di utilizzo del veicolo stesso; questa affermazione è particolarmente vera se nella regione considerata la produzione di energia avviene principalmente tramite l'utilizzo di risorse rinnovabili, poiché in questa maniera le maggiori emissioni causate dalla produzione del veicolo elettrico rispetto a un veicolo con motore a combustione interna vengono pareggiate dopo una percorrenza di utilizzo modesta. Considerando invece un contesto di produzione energetica che si sostiene sia sull'utilizzo di risorse rinnovabili sia combustibili fossili, come il mix energetico italiano e della maggior parte dei paesi europei i vantaggi della sostituzione totale sono limitati e in generale si può dire che bisogna tenere in considerazione che prima di ottenere reali riduzioni nelle emissioni bisogna che i veicoli BEV percorrano una distanza non trascurabile. Infine in contesti in cui la produzione di energia elettrica è sostenuta principalmente da combustibili fossili i livelli di emissioni in termini assoluti sono leggermente inferiori per i veicoli BEV ma il vantaggio non giustifica l'utilizzo di una tecnologia molto più costosa, considerando anche il contesto sociale della regione considerata.

Ovviamente queste conclusioni sono vere considerate le attuali tecnologie, sia per quanto riguarda la produzione di energia elettrica e l'efficienza dei veicoli, sia le tecniche produttive che sicuramente nei prossimi anni subiranno delle modifiche e probabilmente si riusciranno ad avere delle emissioni minori anche nella produzione di veicoli BEV.

4. Contesto normativo in Europa

La necessità di normare le emissioni dei veicoli nasce dall'inizio degli anni '60 quando il numero di veicoli ha iniziato a crescere e di conseguenza è aumentato lo smog urbano e la qualità dell'aria ha iniziato a degradare. In particolare in città molto affollate come quelle degli Stati Uniti si iniziarono a verificare dei fenomeni di smog fotochimico nelle giornate soleggiate e questo diede l'avvio allo sviluppo di un contesto normativo.

Attualmente in Europa ci sono due normative differenti per il controllo delle emissioni di inquinanti e per le emissioni di CO_2 .

4.1 Normativa per le emissioni di inquinanti

Gli standard normativi riguardanti le emissioni di inquinanti in Europa prendono il nome di "Euro" seguiti da una numerazione progressiva partendo da Euro 1. Viene ora proposta una rapida analisi dei diversi standard introdotti dall'Euro 1 fino all'Euro 7 che deve entrare in vigore prossimamente. È importante tenere in considerazione che gli standard Euro non sono fuel neutral a differenza di quelli per esempio presenti negli Stati Uniti, ovvero sono imposti limiti differenti per i diversi tipi di inquinanti a seconda che il veicolo testato sia un veicolo ad accensione comandata o ad accensione per compressione.

- Standard Euro 1: questo standard è stato introdotto nel 1993 con la Direttiva 91/441/EEC; l'introduzione di questa direttiva è stata particolarmente importante poiché ha imposto l'introduzione del catalizzatore sui veicoli ad accensione comandata e per i veicoli ad accensione per compressione diventa obbligatorio l'introduzione dell'alimentazione a iniezione. Inoltre impone i primi limiti per le emissioni di inquinanti. Il ciclo normativo che è stato introdotto viene proposto in figura 29.

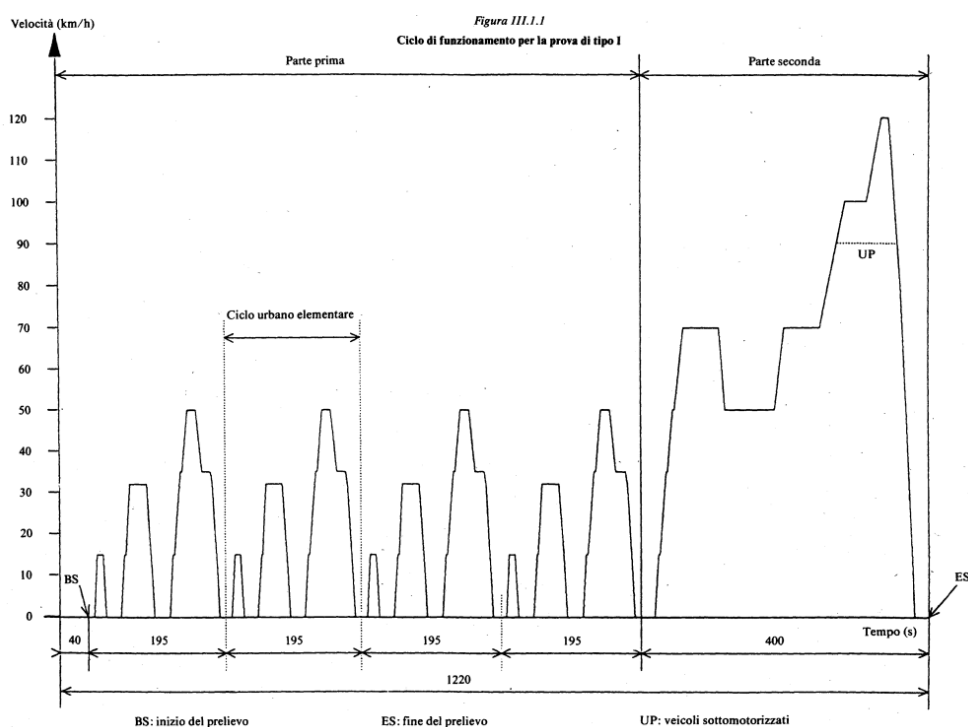


Figura 29 Primo ciclo omologativo introdotto. Fonte: (CEE, 1991)

- Standard Euro 2: questo standard introduce limiti più stringenti sulle emissioni. La normativa di riferimento è la 94/12 CE e i veicoli immatricolati dal primo gennaio 1997 devono sottostare a questo standard.
- Standard Euro 3: fa riferimento alla normativa 97/24 CE e i veicoli immatricolati a partire dal primo gennaio 2001 devono sottostare a questo standard. L'introduzione di questo nuovo standard è particolarmente importante perché oltre a settare limiti ulteriormente più stringenti sulle emissioni per entrambe le tipologie di veicoli apporta diverse modifiche rispetto agli standard precedenti. Come prima modifica separa le emissioni di HC da quelle di NO_x e limita notevolmente le emissioni di questi ultimi per i veicoli ad accensione per compressione. Viene modificato il ciclo abolendo la fase di pre-condizionamento, quindi il test inizia con motore a freddo e prende il nome di NEDC.

Inoltre viene introdotto il sistema OBD di seconda generazione che in Europa prende il nome di EOBD andando a sostituire quello precedente diventato ormai obsoleto. La Direttiva con cui viene introdotto questo sistema è la 98/69/CE e permette di effettuare un monitoraggio continuo dei sistemi che in caso di guasto provocano un innalzamento delle emissioni e provvede a segnalare il guasto all'utente tramite una spia che prende il nome di MIL. Inoltre ogni anomalia viene registrata con un codice di guasto DTC standardizzato insieme alle condizioni operative del motore nel momento in cui l'anomalia è stata registrata. La Direttiva inoltre introduce una compatibilità universale del sistema.

- Standard Euro 4: fa riferimento alla Direttiva 2002/80 CE e i veicoli immatricolati a partire dal primo gennaio 2006 devono sottostare a questo standard omologativo. Come avvenuto per le Direttive precedenti anche in questo caso vi è stato un inasprimento dei limiti sulle emissioni sia per veicoli ad accensione comandata sia per veicoli ad accensione per compressione e questo ha incentivato l'introduzione di alcuni sistemi di post trattamento dei gas di scarico nei veicoli ad accensione per compressione, in particolare il sistema DPF e i sistemi SCR, seppur non li ha resi obbligatori.
- Standard Euro 5: questo standard fa riferimento alla Direttiva 715/2007 CE e i veicoli immatricolati a partire dal primo gennaio 2011 devono obbligatoriamente sottostare a questo nuovo standard sulle emissioni. Questo standard come avvenuto per l'Euro 3 ha segnato delle importanti differenze rispetto a quelli precedenti, infatti viene imposta una riduzione sulle emissioni rispetto all'Euro 4 ma viene anche introdotto un limite sul numero di particelle di particolato emesse (PN) e abbassa sensibilmente il limite sul PM andando a rendere di fatto obbligatorio l'introduzione del DPF; inoltre viene anche introdotto per la prima volta un limite sulle emissioni di PM e PN anche per i veicoli ad accensione comandata. Oltre a ciò viene esteso il monitoraggio dell'OBD ad altri componenti e introduce delle soglie più severe per l'accensione della MIL di guasto e infine viene aumentata la durata di conformità a 160000 km o 5 anni.
- Standard Euro 6: a differenza di quanto avvenuto con gli standard precedenti ha subito diverse revisioni andando a cambiare la propria nomenclatura partendo da Euro 6a fino ad arrivare ad Euro 6e; i veicoli immatricolati a partire dal primo gennaio 2014 devono sottostare a questo nuovo standard. Le novità introdotte con le diverse revisioni sono state diverse, tra le quali possiamo citare: una riduzione sensibile delle emissioni di NO_x per i veicoli ad accensione

per compressione che ha di fatto imposto l'utilizzo di sistemi SCR o LNT; dal 2017 ha imposto test su strada RDE per verificare le emissioni; viene introdotto un nuovo ciclo omologativo, il ciclo WLTC considerato più realistico rispetto al NEDC utilizzato in passato; infine estende il controllo del sistema OBD a nuovi sistemi e abbassa le soglie per l'attivazione della MIL.

- Standard Euro 7: questo standard deve ancora entrare in vigore e attualmente si prevede che possa entrare in vigore dal 29 novembre 2026 per le nuove omologazioni, mentre un anno dopo per le nuove immatricolazioni. Le novità che si pensa vengano introdotte con questo nuovo standard sono diverse tra cui possiamo citare: imposizione di limiti di emissione anche per i veicoli elettrici per la prima volta; introduzione di emissioni non legate allo scarico del veicolo andando quindi a verificare anche l'impatto dell'usura degli pneumatici e dei freni; viene estesa la durata di conformità a 10 anni o 200000 km, oltre a introdurre test sulla degradazione nel tempo delle batterie.

Per quanto riguarda i limiti sulle emissioni invece non vengono ulteriormente ridotti rispetto allo standard Euro 6e ma viene introdotto il sistema OBM che permette di avere un monitoraggio da remoto delle emissioni per verificare la conformità delle emissioni reali con quelle omologate (RAC, 2025).

4.2 Normativa per le emissioni di CO_2

Le emissioni di CO_2 come abbiamo ampiamente visto sono tanto importanti quanto quelle degli inquinanti. La Commissione Europea inizialmente ha deciso di optare per una regolamentazione su base volontaria dei costruttori, i quali dichiaravano di impegnarsi a raggiungere entro il 2009 delle emissioni di 140 g/km di CO_2 . La situazione è stata monitorata fino a quando non ci si è accorti che difficilmente si sarebbe raggiunto l'obiettivo target e di conseguenza la Commissione ha deciso di agire.

Dal 2009 tramite una serie di step successivi è stata emanata una legge tale per cui dal 2012 il valore medio di flotta doveva essere di 130 g/km.

Inizialmente gli step che si prevedeva di seguire erano i seguenti:

- Dal 2012 limite imposto di 130 g/km di CO_2 ;
- Dal 2020 limite imposto di 95 g/km di CO_2 ;
- Dal 2025 limite imposto -15% rispetto al 2021 che corrisponde a 71 g/km di CO_2 su NEDC;
- Dal 2030 limite imposto -37.5% rispetto al 2025 che corrisponde a 59 g/km di CO_2 su NEDC.

Tuttavia questi valori di emissioni si riferivano al ciclo NEDC, invece dal 2018 è iniziata una transizione graduale dal ciclo NEDC al WLTC, il quale è più rappresentativo delle condizioni reali di guida e di conseguenza i valori di emissioni ottenuti sono superiori rispetto al NEDC.

Durante il periodo di transizione quindi si sono misurate le emissioni di CO_2 sul WLTC e poi si eseguiva una "Back correlation" utilizzando un software rilasciato dalla Commissione Europea chiamato CO2MPAS il cui compito sostanzialmente era quello di fare una correlazione tra i valori ottenuti su WLTC con quelli che si sarebbero ottenuti eseguendo il ciclo NEDC. Dal 2021 questo passaggio non viene più eseguito e si riportano i valori ottenuti sul WLTC.

Nel caso in cui il costruttore a fine anno non rientra nel target è obbligata a pagare una sanzione che dal 2019 è pari a:

$$\left[\frac{\text{g}}{\text{km}} \right] \text{ in più} * 95 [\text{€}] * n \quad (2)$$

Dove n è il numero di veicoli venduti nell'anno.

La Commissione Europea per quanto riguarda le emissioni di CO_2 è interessata alla media dei veicoli introdotti sul mercato, di conseguenza nel calcolo per verificare se un costruttore abbia superato o meno il target previsto vengono considerati anche i veicoli puramente elettrici, che essendo registrati come veicoli a emissioni zero (anche definiti ZEV) aiutano molto ad abbassare la media delle emissioni di flotta; inoltre per lo stesso motivo vengono previste alcune opportunità per i costruttori che prendono il nome di flexibilities.

La prima flexibility è la concessione di considerare la media di flotta di un costruttore insieme a quella di un altro o più costruttori; un'altra flexibility è lo sconto effettuato ai costruttori con bassi volumi di produzione (inferiori alle 10000 unità annue); infine l'ultima flexibility è chiamata "Eco-innovation" che tiene conto del fatto che il ciclo di omologazione non tiene in considerazione di alcune tecnologie che possono essere presenti sul veicolo, per esempio un costruttore può dimostrare di avere installato un condizionatore particolarmente efficiente che comporta un risparmio di consumi e chiedere la rimozione dal dichiarato del corrispondente. La massima riduzione che si può chiedere è di 7 g/km.

I risultati ottenuti con l'introduzione di questa normativa è stata soddisfacente, tuttavia risulta sempre più complesso per i costruttori rientrare entro i limiti imposti con gli ultimi step della normativa.

Infine è stata introdotta una novità riguardante i veicoli denominati ZLEV ovvero Zero and Low Emission Vehicle. Appartengono a questa categoria i veicoli con emissioni di CO_2 comprese tra 0 e 50 g/km. La normativa prevede dei target di vendita di questa tipologia di veicoli che era il 15% entro il 2025 e il 35% entro il 2030; per i costruttori in grado di raggiungere questi target viene riconosciuto un bonus aumentando il limite medio di emissioni fino al 5%. Nel caso in cui questo target non venga rispettato i costruttori non ottengono né bonus né malus (Prof. Spessa, 2023).

5. Il processo omologativo per i veicoli leggeri in Europa

Nel capitolo precedente è stata analizzata l'evoluzione degli Standard e delle Direttive a cui i veicoli leggeri devono sottostare per poter essere omologati nell'Unione Europea; in questo capitolo viene invece analizzato il processo omologativo sia per veicoli ICE sia per veicoli BEV e verranno messe in luce le principali differenze tra le due procedure.

Prima di analizzare l'attuale procedura di omologazione tuttavia viene mostrato anche il precedente processo omologativo.

Con l'introduzione degli Standard europei è risultato necessario costruire un ciclo guida su cui eseguire le analisi di emissioni degli inquinanti che fosse il più rappresentativo possibile delle reali condizioni di guida. Per raggiungere questo scopo è stato costruito il ciclo a livello statistico analizzando i comportamenti dei veicoli in città; il ciclo è quello mostrato in figura (mettere numero figura del ciclo precedente) e inizialmente ha preso il nome di ECE + EUDC dove ECE sta per "Economic Commision for Europe" mentre EUDC è l'acronimo di "Extra-Urban Driving Cycle".

Il processo omologativo consisteva nel posizionare il veicolo sul banco rulli ed eseguire una fase di preriscaldamento del veicolo di 40 secondi, terminata la quale iniziava la percorrenza del ciclo. Questa procedura è stata mantenuta fino all'introduzione dell'Euro 3, quando è stata rimossa la fase di preriscaldamento per rendere l'analisi delle emissioni più verosimili alle condizioni reali considerando quindi anche la partenza a freddo del veicolo. Con l'introduzione di questa modifica il ciclo ha preso il nome di NEDC.

Il ciclo NEDC nonostante puntasse a essere un ciclo rappresentativo delle reali condizioni di guida in realtà era piuttosto lontano dall'essere accostabile all'utilizzo reale dei veicoli, infatti la velocità media lungo il ciclo è di 33.35 [km/h] mentre l'accelerazione media risulta essere di 0.506 [m/s^2] con un massimo di 1.042 [m/s^2]; inoltre anche il tempo di percorrenza e la lunghezza del tratto percorso risultavano essere abbastanza modesti attestandosi su una durata complessiva di 1180 [s] di cui ben 267 di stop mentre la distanza percorsa risultava essere di soli 11 [km].

A prova di quanto poco stressante fosse il ciclo NEDC vengono mostrati i punti di funzionamento del motore di un veicolo durante la sua percorrenza.

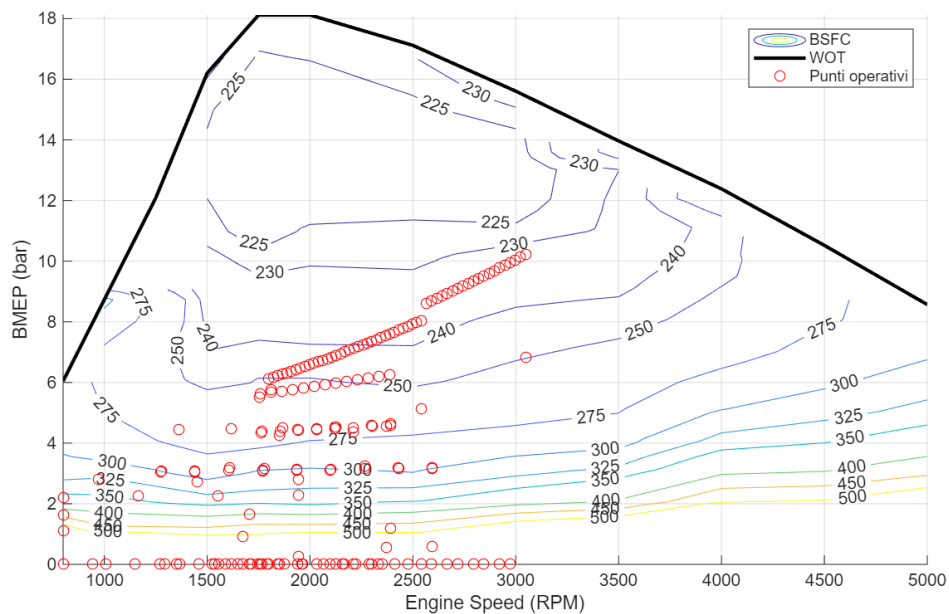


Figura 30 Punti motore ciclo NEDC. Fonte dati: (Prof. Millo, 2025)

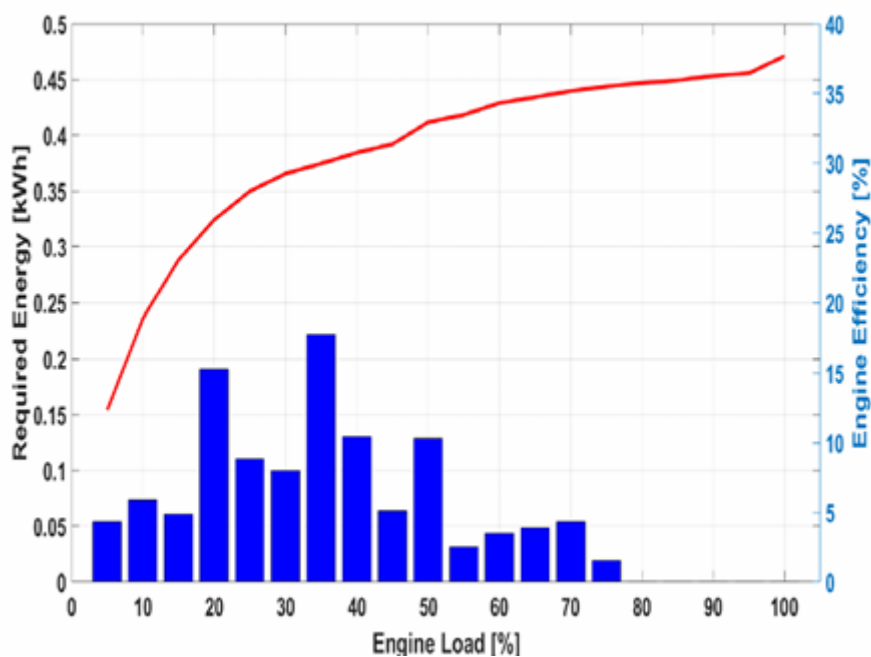


Figura 31 Carichi motore durante ciclo NEDC. Fonte: (Prof. Millo, 2025)

Come si può facilmente notare dai grafici mostrati in figura 30 e 31 i punti di funzionamento del motore sono raggruppati in un'area molto ristretta e lontani dal punto di massimo funzionamento del motore; inoltre i cambi marcia sono imposti durante la percorrenza del ciclo.

Oltre a quanto detto fino ad ora il ciclo è stato oggetto di diverse controversie, poiché data la sua struttura risultava possibile insegnare alla centralina quando il veicolo stava percorrendo il ciclo omologativo e cambiare la mappatura del motore per ottenere dei risultati di emissioni migliori rispetto alle condizioni di funzionamento reale.

5.1 WLTC per veicoli leggeri ICE

A fronte di tutte queste problematiche del ciclo NEDC e per cercare di rendere più omogeneo il processo omologativo in tutto il mondo, a partire dal 2010 si è cercato di realizzare un ciclo che fosse adottato universalmente col nome di WLTC; purtroppo l'obiettivo possiamo dire che è stato raggiunto solo parzialmente in quanto gli Stati Uniti a un certo punto sono usciti dal consorzio e ancora oggi utilizzano il loro ciclo omologativo. Da questo capitolo in avanti tutti i riferimenti a come è strutturato il ciclo omologativo e alla sua costruzione fanno riferimento al regolamento ONU ufficiale (UNECE, 2021)

Per la costruzione del ciclo si sono utilizzati i dati reali di guida provenienti da diverse zone geografiche, in modo che fosse il più rappresentativo possibile di tutte le condizioni reali di guida; il risultato è stato la costruzione di un ciclo molto più aggressivo del ciclo NEDC e più verosimile. Inoltre a differenza del ciclo precedentemente adottato i cambi di marcia sono normati tramite una formula matematica e non vengono imposti.

Per poter omologare in modo adeguato i veicoli di tutto il mondo è necessario fare fronte alle differenti tipologie di veicoli che si possono incontrare nelle diverse zone geografiche; per fare ciò i veicoli vengono classificati in tre classi sulla base della potenza e del peso del veicolo. Viene definito il rapporto in questa maniera:

$$P_{mr} = \frac{\text{Potenza}}{\text{Peso in ordine di marcia} - 75} \quad (3)$$

I veicoli sono suddivisi nelle classi secondo i seguenti criteri:

- Appartengono alla classe 1 se:

$$P_{mr} \leq 22 \text{ [W/kg]}; \quad (4)$$

- Appartengono alla classe 2 se:

$$22 \leq P_{mr} \leq 34 \text{ [W/kg]}; \quad (5)$$

- Appartengono alla classe 3 se:

$$P_{mr} > 34 \text{ [W/kg]}. \quad (6)$$

Inoltre i veicoli di classe 3 vengono ulteriormente suddivisi in 2 sottoclassi la cui discriminante è il raggiungimento o meno della velocità di 120 km/h.

Il ciclo subisce delle modifiche se si sta omologando un veicolo appartenente a una classe o all'altra, in questa analisi viene approfondito il ciclo omologativo per i veicoli di classe 3 in quanto la quasi totalità dei veicoli presenti sul mercato europeo appartengono a questa classe.

Il ciclo si può suddividere in 4 fasi sulla base delle velocità raggiunte e al termine di ogni fase vi è un periodo di stop:

- Fase low;
- Fase medium;

- Fase high;
- Fase extra high;

Dalla figura 32 fino alla figura 35 viene mostrato l'andamento delle singole fasi e infine il ciclo totale.

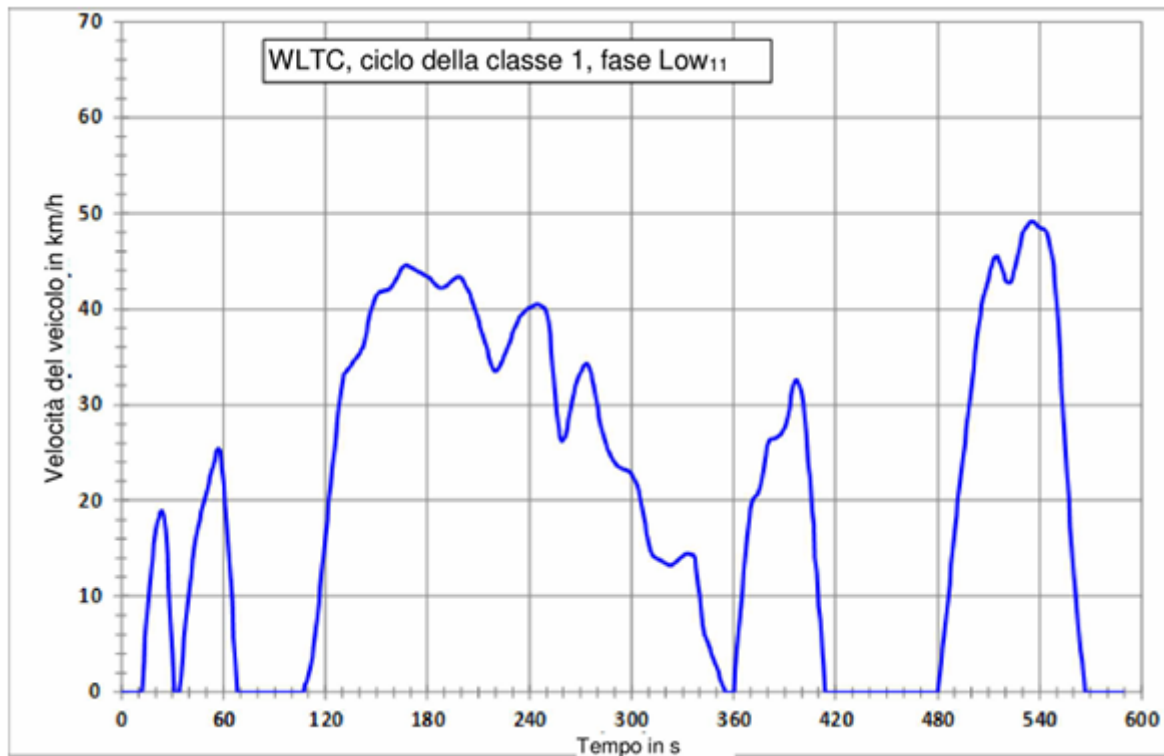


Figura 32 Fase low del ciclo WLTC. Fonte: (UNECE, 2021)

Per la fase low viene riportato il ciclo della classe 1 poiché il ciclo della classe 3 sul documento della normativa non è completamente visibile e in ogni caso la fase low è identica per tutte le classi.

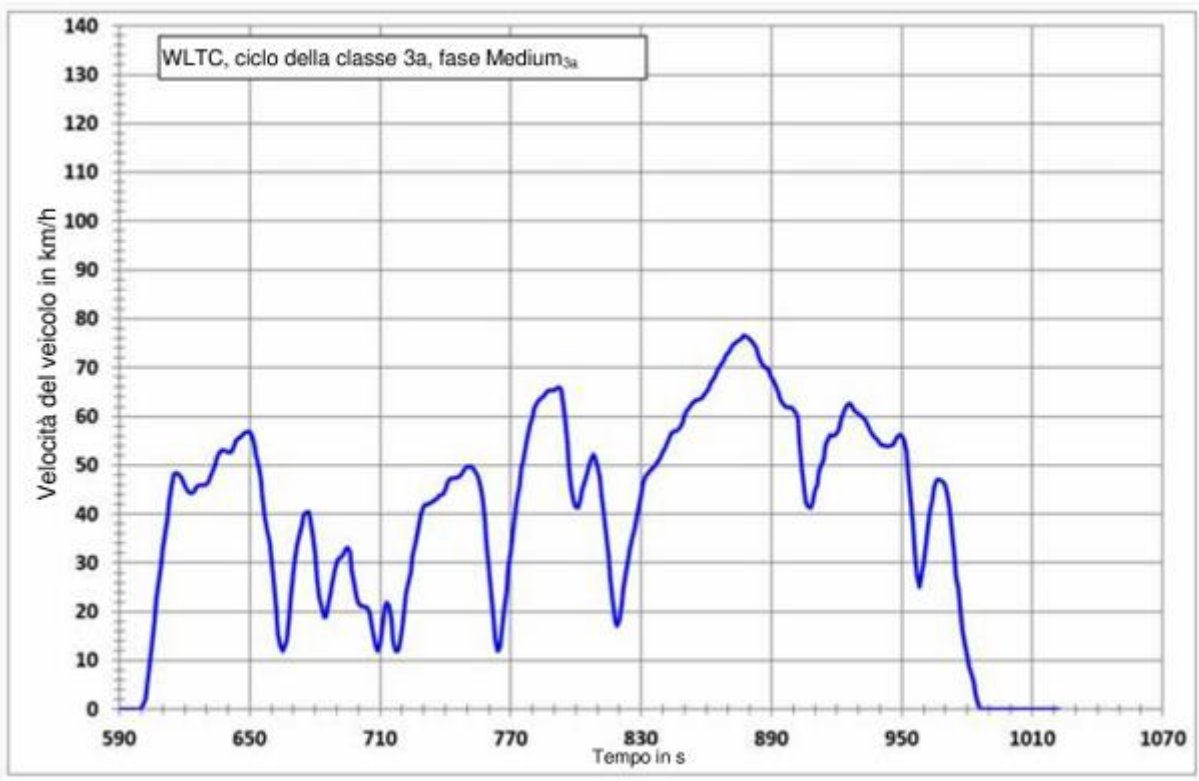


Figura 33 Fase medium del ciclo WLTC. Fonte: (UNECE, 2021)

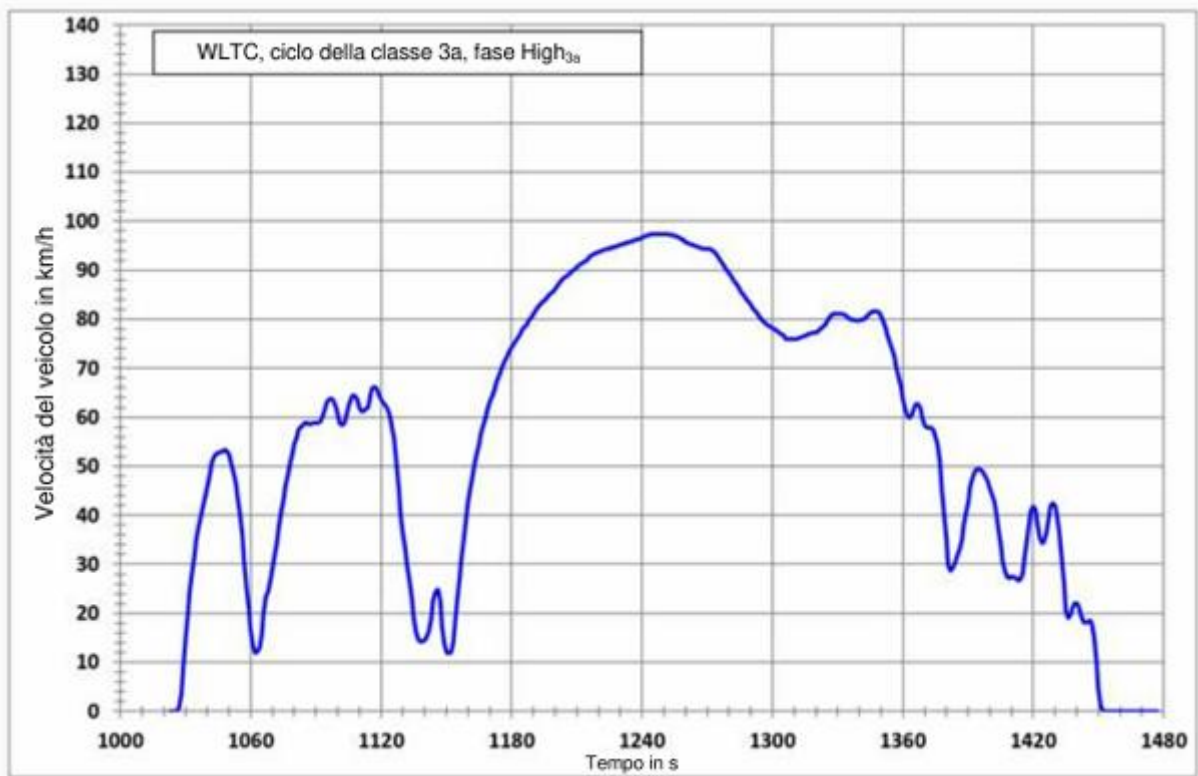


Figura 34 Fase high del ciclo WLTC. Fonte: (UNECE, 2021)

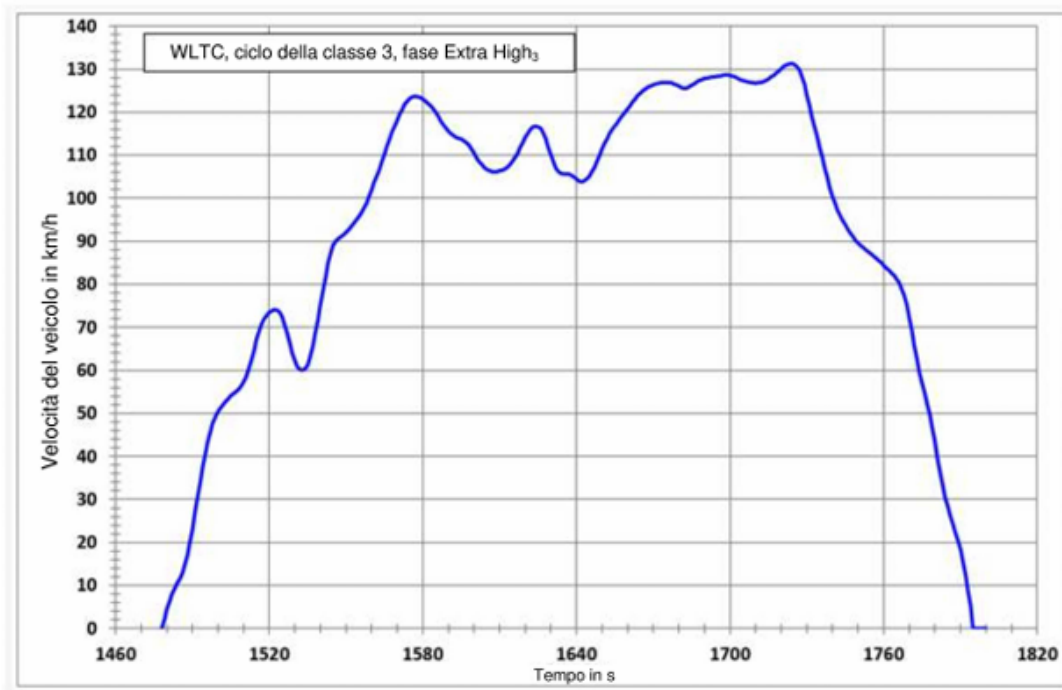


Figura 35 Fase extra-high del ciclo. Fonte: (UNECE, 2021)

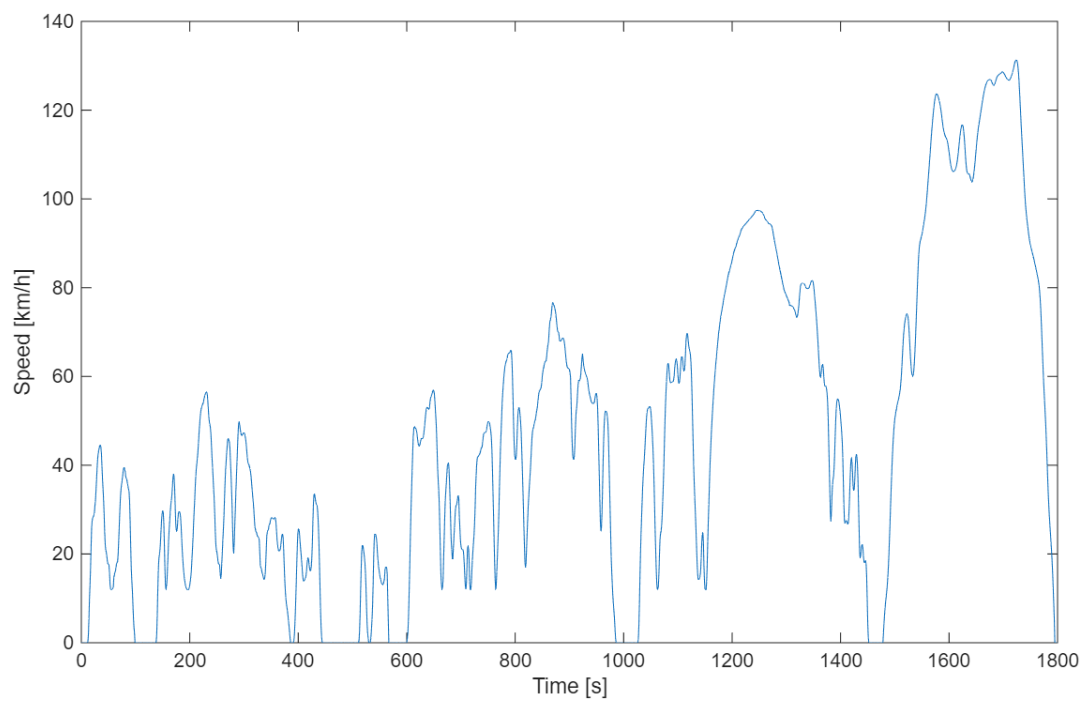


Figura 36 Ciclo completo WLTC per veicoli ICE

Eseguendo anche solo una rapida comparazione visiva tra il ciclo WLTC e il ciclo NEDC si può vedere come il primo presenti tempi di stop molto meno importanti, accelerazioni più brusche e velocità raggiunte superiori.

Nelle figure 37 e 38 vengono riportati anche i punti di funzionamento motore per un veicolo medio durante la percorrenza del ciclo WLTC e un grafico riportante i carichi del motore come fatto per il ciclo NEDC.

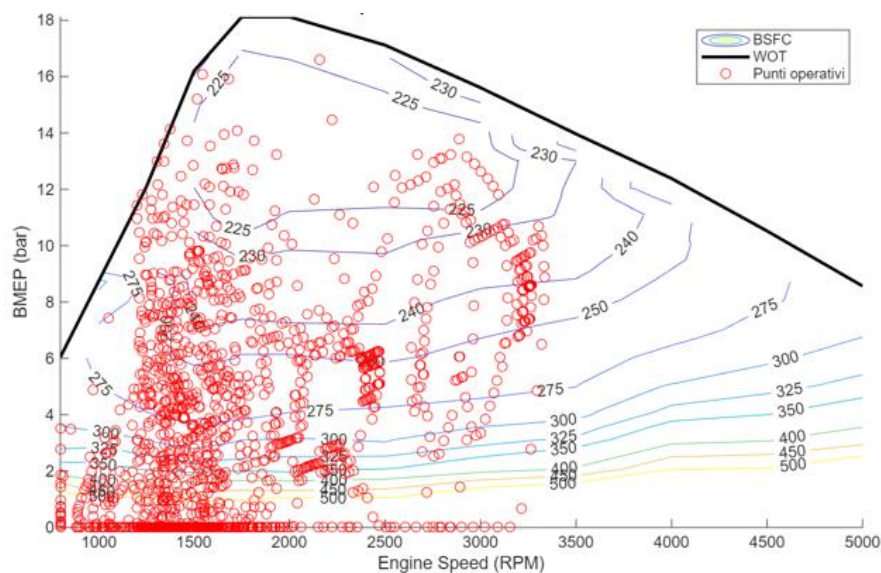


Figura 37 Punti di funzionamento motore durante il ciclo WLTC. Fonte dati: (Prof. Millo, 2025)

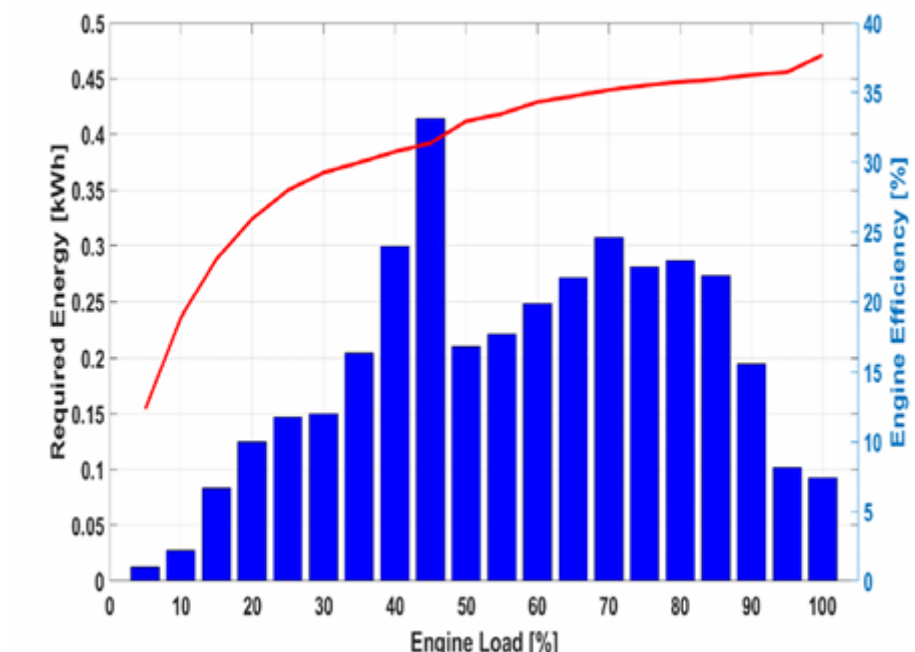


Figura 38 Carichi motore durante il ciclo WLTC. Fonte: (Prof. Millo, 2025)

5.2 Downscaling del ciclo WLTC

Il ciclo descritto nel paragrafo precedente è il ciclo che normalmente viene utilizzato per l'omologazione dei veicoli ICE; tuttavia se il veicolo da omologare ricade in alcune casistiche particolari è necessario apportare alcune modifiche al ciclo.

Se il veicolo considerato è caratterizzato da un rapporto peso-potenza vicino alla linea di demarcazione tra 2 categorie possono insorgere problemi di guidabilità nelle fasi del ciclo in cui viene chiesto di raggiungere le velocità maggiori e quando si affrontano alcune accelerazioni; in questo caso bisogna effettuare un downscaling al ciclo per poter omologare correttamente il veicolo. I criteri con cui viene eseguito il downscaling cambiano a seconda della classe di appartenenza del veicolo, come fatto per il ciclo “base” viene approfondito il caso di un veicolo appartenente alla classe 3.

Prima di vedere come si modifica il ciclo viene mostrato il criterio con cui viene scelto il fattore di downscaling da applicare.

Il fattore di riduzione f_{dsc} viene calcolato come il rapporto tra la potenza massima richiesta nella fase del ciclo considerato e la potenza nominale del veicolo; la potenza massima richiesta dalla fase viene calcolata come:

$$P_{req,max,i} = \frac{((f_0 \times v_i) + (f_1 \times v_i^2) + (f_2 \times v_i^3) + (1.03 \times TM \times v_i \times a_i))}{3600} \quad (7)$$

Dove:

- f_0, f_1, f_2 sono i coefficienti di resistenza all'avanzamento in [N], [N/(km/h)], [N/(km/h)²];
- TM è la massa di prova applicabile;
- v_i è la velocità all'istante i esimo in [km/h];
- a_i è l'accelerazione all'istante i esimo in m/s^2 .

Calcolata la potenza richiesta si può facilmente calcolare il rapporto:

$$r_{max} = \frac{P_{req,max,i}}{P_{rated}} \quad (8)$$

A questo punto bisogna semplicemente verificare se r_{max} è maggiore o inferiore a un valore standard r_0 in base alla classe considerata; per la classe 3 r_0 vale 0.867.

Se $r_{max} < r_0$ allora $f_{dsc} = 0$; altrimenti:

$$f_{dsc} = a_1 \times r_{max} + b_1 \quad (9)$$

Dove a_1 e b_1 sono dei fattori adimensionali con un valore standard per la classe di appartenenza del veicolo.

Per i veicoli appartenenti alla classe 3 la fase critica è tipicamente la fase “Extra high”, di conseguenza le modifiche al ciclo coinvolgono quello che avviene tra il secondo 1533 e il secondo

1762. Considerando il ciclo base si può ricavare l'accelerazione come:

$$a_{orig} = \frac{v_{i+1} - v_i}{3.6} \quad (10)$$

Dove:

- a_{orig} è l'accelerazione calcolata in [m/s];
- v_i è la velocità all'istante i esimo in [km/h].

La riduzione la si deve applicare inizialmente tra il secondo 1553 e il secondo 1724, istante in cui viene raggiunta la velocità massima nel ciclo di base. Il tracciato della velocità seguito nel ciclo ridotto è caratterizzato dalla seguente equazione:

$$v_{dsc_{i+1}} = v_{dsc_i} + a_{orig_i} \times (1 - f_{dsc}) \times 3.6 \quad (11)$$

Al secondo 1763 si vuole che la velocità raggiunta nel ciclo con l'applicazione del downscaling sia pari a quella nello stesso istante di tempo del ciclo base e affinché ciò possa avvenire bisogna calcolare un fattore di decelerazione come:

$$f_{corr,dec} = \frac{v_{dsc_{1724}} - 82.6}{v_{orig_{1724}} - 82.6} \quad (12)$$

Infine la velocità tra il secondo 1725 e il secondo 1762 deve essere calcolata come:

$$v_{dsc_i} = v_{dsc_{i-1}} + a_{orig_{i-1}} \times f_{corr,dec} \times 3.6 \quad (13)$$

In figura 39 viene mostrato un esempio di come si modifica il ciclo nella fase interessata seguendo questa procedura.

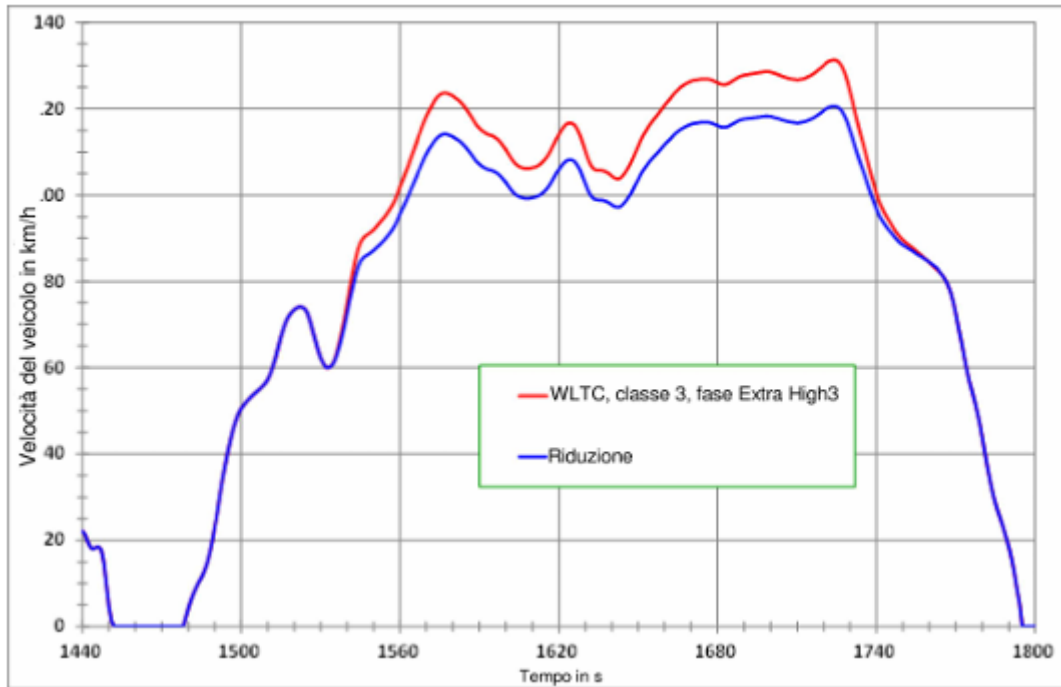


Figura 39 Esempio di downscaling applicabile secondo normativa. Fonte: (UNECE, 2021)

Nel caso in cui a seguito della riduzione il veicolo non sia comunque in grado di seguire il ciclo entro i limiti di tolleranza previsti dalla normativa si devono percorrere questi tratti con l'acceleratore premuto a fondo.

Nel caso in cui invece la velocità massima raggiungibile dal veicolo rimanga inferiore rispetto a quella prevista dal ciclo ridotto bisogna applicare un'altra modifica del ciclo, normata per veicoli che hanno una velocità massima inferiore rispetto al ciclo di riferimento.

5.3 Modifica per veicoli con velocità massima inferiore a quella prevista

È importante specificare che questa modifica è da applicare principalmente a veicoli che sono tecnicamente in grado di seguire il ciclo di base in ogni sua fase ma che hanno una velocità di picco inferiore rispetto a quella prevista dal ciclo stesso.

In questo paragrafo verrà designato $v_{max,cycle}$ come la velocità massima prevista dal ciclo e con v_{cap} la velocità massima raggiungibile dal veicolo.

L'obiettivo di questa modifica è ricavare un ciclo provvisorio in cui vengano sostituiti tutti gli istanti in cui $v_i > v_{cap}$. La normativa prevede la modifica del ciclo base già nel caso in cui la velocità massima del veicolo sia inferiore rispetto a quella raggiunta nella fase medium; siccome concettualmente le modifiche avvengono seguendo la stessa procedura, in questa analisi viene mostrato il caso più ricorrente ovvero il caso in cui la fase da modificare sia solamente quella Extra-high.

Come prima cosa bisogna calcolare la distanza idealmente percorsa nel ciclo base e quella realmente percorsa con il veicolo a velocità limitata sfruttando la seguente equazione:

$$d_{exhigh} = \sum \frac{v_i + v_{i-1}}{2 \times 3.6} \times (t_i - t_{i-1}) \quad (14)$$

Calcolate le due distanze percorse è ora possibile calcolare il numero di istanti di tempo da aggiungere come:

$$\Delta t_{exhigh} = \frac{d_{baseexhigh} - d_{capexhigh}}{v_{cap}} \times 3.6 \quad (15)$$

A questo punto è necessario costruire il ciclo definitivo che il veicolo deve seguire. Viene seguito il ciclo base fino all'istante in cui la velocità del veicolo $v = v_{cap}$ e si segna questo istante di tempo come t_{ex_high} ; a questo punto bisogna aggiungere gli n_{add,ex_high} istanti di tempo pari a Δt_{ex_high} in cui la velocità v del veicolo è pari a v_{cap} . Infine va aggiunta l'ultima fase del ciclo ad altissima velocità che sarà identica a quella del ciclo base; al termine dobbiamo ottenere un ciclo di durata pari a:

$$t = 1800 + n_{add,exhigh} \quad (16)$$

se si segue questa procedura nel modo corretto si riesce a ottenere un ciclo modificato la cui distanza percorsa sarà pari alla distanza originale a meno delle approssimazioni che vanno comunque eseguite secondo normativa.

5.4 WLTC per veicoli BEV

La procedura omologativa volta a determinare l'autonomia del veicolo e il consumo di energia elettrica, a differenza di quanto visto con i veicoli ICE, si basa e subisce delle modifiche sulla base del PER (Pure Electric Range), ovvero l'autonomia esclusivamente elettrica del veicolo stimata dal costruttore.

In particolare possono essere eseguite due procedure differenti: la procedura ridotta o la procedura a cicli consecutivi.

Nel caso in cui il PER sia inferiore a 3 cicli WLTC applicabili bisogna seguire la procedura a cicli consecutivi; la prova consiste come facilmente intuibile nell'eseguire i cicli di prova applicabili fino al raggiungimento del criterio di interruzione. Quest'ultimo viene raggiunto quando il veicolo non è più in grado di seguire il ciclo entro le tolleranze indicate per più di 4 secondi di fila. Una volta raggiunta questa condizione l'acceleratore va rilasciato e il veicolo deve fermarsi in un periodo massimo di 60 secondi.

Tra un ciclo e l'altro è possibile per il guidatore effettuare una pausa di massimo 10 minuti durante la quale il gruppo propulsore deve essere spento.

Nel caso in cui invece il PER sia superiore a 3 cicli WLTC applicabili il costruttore deve eseguire la prova di tipo abbreviata.

Questo tipo di prova differisce in maniera più marcata rispetto alla procedura vista per i veicoli ICE; il tracciato che il veicolo deve percorrere infatti è composto da due segmenti dinamici che da normativa prendono il nome di DS_1 e DS_2 e due segmenti a velocità costante che da normativa prendono il nome di CSS_M e CSS_E .

In figura 40 viene mostrato un esempio di ciclo tipo costruito in questa maniera.

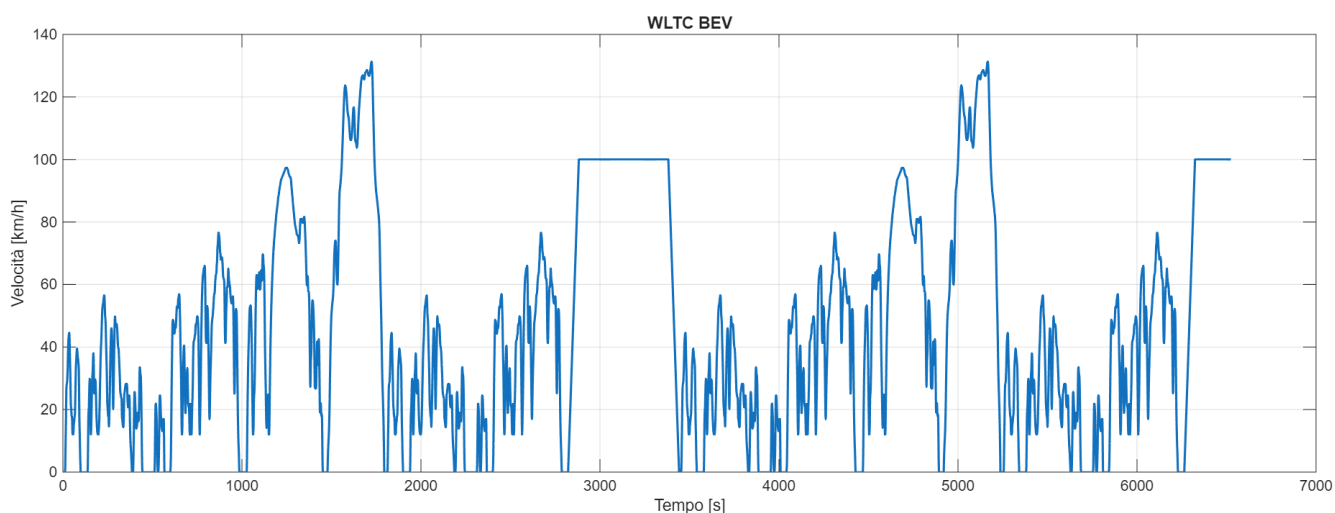


Figura 40 Esempio di ciclo WLTC con procedura abbreviata per veicoli BEV

I due segmenti dinamici sono composti da un ciclo WLTC come quello visto per i veicoli ICE seguito da un ciclo urbano; viene definito dalla normativa ciclo urbano un ciclo che comprende le fasi low e medium del ciclo WLTC.

Per quanto riguarda i segmenti a velocità costante invece è necessario raggiungere la velocità prefissata entro un tempo massimo di 60 secondi e al termine della fase bisogna far fermare il veicolo entro lo stesso periodo di tempo; secondo la normativa questi tratti devono essere percorsi con una velocità minima di 100 km/h, mentre nel caso in cui il veicolo abbia una velocità massima inferiore affinché il ciclo sia considerato valido bisogna percorrere questi segmenti alla massima velocità raggiungibile dal veicolo.

Anche per quanto riguarda i veicoli elettrici sono previste delle modifiche che devono essere apportate nello stesso modo di quelle viste per i veicoli con motore a combustione interna.

La normativa impone un vincolo molto stringente per considerare accettabile il test di omologazione, ovvero la percentuale di energia rimanente nel pacco batteria al termine del secondo segmento dinamico deve essere pari o inferiore al 10%; inoltre il veicolo deve raggiungere il criterio di interruzione necessariamente nel secondo tratto a velocità costante.

Il criterio di interruzione si raggiunge quando il veicolo non è più in grado di mantenere la velocità costante nel secondo tratto a velocità costante entro le tolleranze indicate; una volta avvenuto ciò il veicolo deve essere arrestato entro 60 secondi con il comando dell'acceleratore disattivato.

Anche per la procedura ridotta sono previste delle pause la cui lunghezza e frequenza dipende dalla lunghezza del primo tratto a velocità costante; in tabella vengono riportate le pause prescritte dalla normativa.

Tabella 3 Tabella riassuntiva delle pause consentite dalla normativa. Fonte: (UNECE, 2021)

Distanza percorsa nel segmento CSS_M [km]	Durata complessiva massima delle pause [min]
Fino a 100	10
Fino a 150	20
Fino a 200	30
Fino a 300	60
Oltre 300	Secondo raccomandazioni del costruttore

6. Sviluppo di un tool Matlab per la simulazione di un ciclo omologativo per veicoli elettrici

L'obiettivo principale di questa tesi è stato lo sviluppo di un tool Matlab per la simulazione di un ciclo omologativo per veicoli elettrici; il target principale di questo tool è quello di restituire in maniera affidabile la durata totale del ciclo omologativo e la distanza percorsa durante il primo tratto a lunghezza costante che si deve svolgere durante il ciclo omologativo; un altro obiettivo di questa tesi è verificare se è possibile trovare un fattore correttivo coerente che permetta di avere una correlazione affidabile tra simulazione e dati reali tramite l'utilizzo di dati provenienti da diversi veicoli.

In questo capitolo verrà mostrato la logica di funzionamento alla base del tool, com'è stato programmato e come funziona.

6.1 Struttura del tool

Prima di iniziare la programmazione del tool stesso è stato necessario mettere in evidenza quali fossero i risultati necessari che il tool dovesse restituire alla fine della simulazione e in secondo luogo il procedimento logico necessario per ottenere tali risultati.

Il primo passo per una corretta esecuzione della simulazione è l'acquisizione dei dati di input necessari per il funzionamento del tool, seguito dalla costruzione del primo ciclo WLTC per veicoli elettrici; una volta costruito il ciclo, sulla base dei dati di input è necessario che il tool verifichi se è necessario effettuare delle modifiche al ciclo precedentemente generato, per esempio a causa del downscaling previsto dalla normativa oppure perché la velocità massima del veicolo è limitata rispetto a quella raggiungibile dal ciclo. In seguito viene costruito il primo tratto a velocità costante.

A questo punto il ciclo omologativo prevede l'esecuzione del secondo ciclo WLTC per veicoli elettrici e il tool lo costruisce identico al primo, di conseguenza se è stato necessario apportare delle modifiche al primo ciclo verranno riprodotte nel medesimo modo anche in questo secondo ciclo; terminato il secondo ciclo il tool verifica lo stato stimato di carica della batteria e se è superiore al 10% entra in un loop iterativo in cui riparte dal tratto a velocità costante allungandolo, fino a quando non si arriva alla fine del secondo ciclo con uno stato di carica della batteria inferiore al 10% come richiesto dalla normativa.

Infine il tool esegue il secondo tratto a velocità costante fino a quando la batteria non si scarica completamente e si interrompe la simulazione.

In figura 41 viene proposto un flowchart che riassume quanto appena descritto.

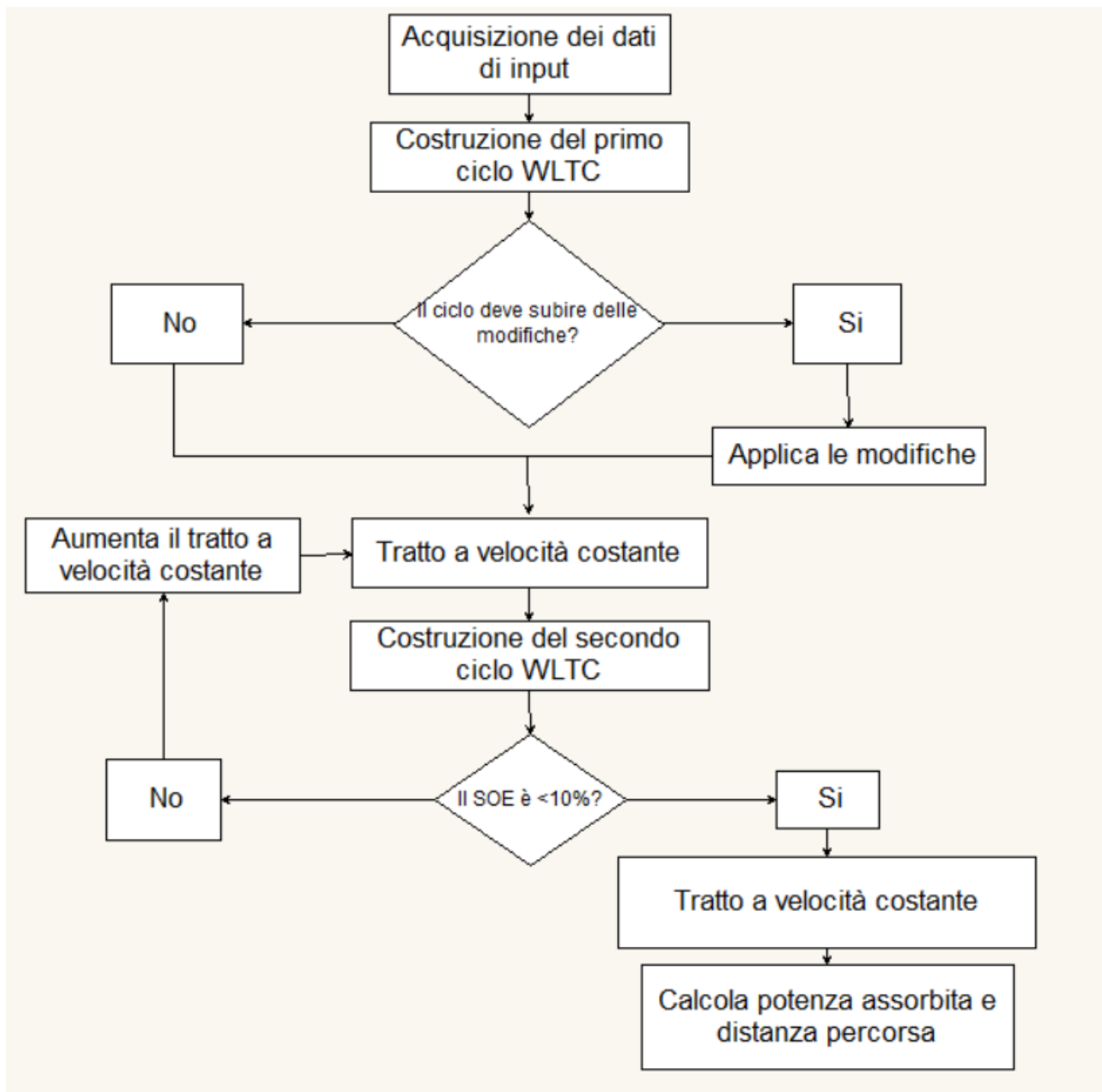


Figura 41 Flowchart funzionamento del tool Matlab

6.2 Acquisizione dei dati di input

Come descritto nel paragrafo precedente il primo passo per l'esecuzione della simulazione è l'acquisizione di alcuni dati fondamentali senza i quali il tool non può lavorare correttamente.

I dati necessari da conoscere a priori sono:

- Massa del veicolo;
- F_0 , F_1 , F_2 che sono i fattori di resistenza all'avanzamento ottenuti sperimentalmente;
- SOE iniziale, ovvero lo stato energetico della batteria all'inizio del ciclo;
- Velocità massima raggiungibile dal veicolo;
- Capacità totale del pacco batteria;
- UBE, ovvero l'energia disponibile;
- Potenza nominale;
- Velocità target, ovvero la velocità che il veicolo deve mantenere lungo i due tratti a velocità costante.

In figura 42 viene mostrata l'interfaccia iniziale del tool con cui l'utente dovrà interagire.

The screenshot displays the initial interface of the simulation tool. It features a top navigation bar with four tabs: 'Inizializzazione' (selected), 'Grafici', 'Risultati', and a '+' icon. Below the tabs, the interface is organized into two columns of input fields. The left column contains: 'massa veicolo' (0), 'Velocità target' (0), 'SOE iniziale' (100), 'Capacità batteria 1' (0), 'Capacità batteria 2' (0), 'UBE' (0), 'F0' (0), 'F1' (0), and 'F2' (0). The right column contains: 'Velocità massima' (0) and 'Potenza nominale' (0). At the bottom center, there is a 'Simulate' button and the text 'Avvia simulazione'.

Tab	Parameter	Value
Inizializzazione	massa veicolo	0
	Velocità target	0
	SOE iniziale	100
	Capacità batteria 1	0
	Capacità batteria 2	0
	UBE	0
	F0	0
	F1	0
	F2	0
Inizializzazione	Velocità massima	0
	Potenza nominale	0

Simulate

Avvia simulazione

Figura 42 Interfaccia utente del tool

6.3 Costruzione del ciclo

La difficoltà nell'eseguire i cicli omologativi per veicoli elettrici a differenza di quanto avviene per i veicoli con motore a combustione interna come già detto è che la lunghezza del ciclo omologativo con la procedura ridotta non è costante ma varia da veicolo a veicolo.

Nei seguenti paragrafi viene esposto come il tool ricostruisce il ciclo omologativo. Da questo paragrafo fino al termine del capitolo, quasi tutti i grafici riportati non presenteranno i valori presenti sugli assi, questo perché sono risultati che si basano su caratteristiche di veicoli reali e non è possibile divulgarli; tuttavia questi grafici sono utili per avere un'idea dei risultati ottenuti e siccome sono costruiti con la stessa scala è possibile effettuare un confronto di massima tra i grafici riportati.

Il primo passo per la costruzione del ciclo omologativo è riprodurre il primo ciclo WLTC per veicoli elettrici; questo ciclo è composto da un ciclo completo WLTC seguito da un ciclo WLTC urbano, ovvero un ciclo composto dalle fasi low+medium del ciclo WLTC.

In figura 43 si può vedere il risultato di questa prima fase.

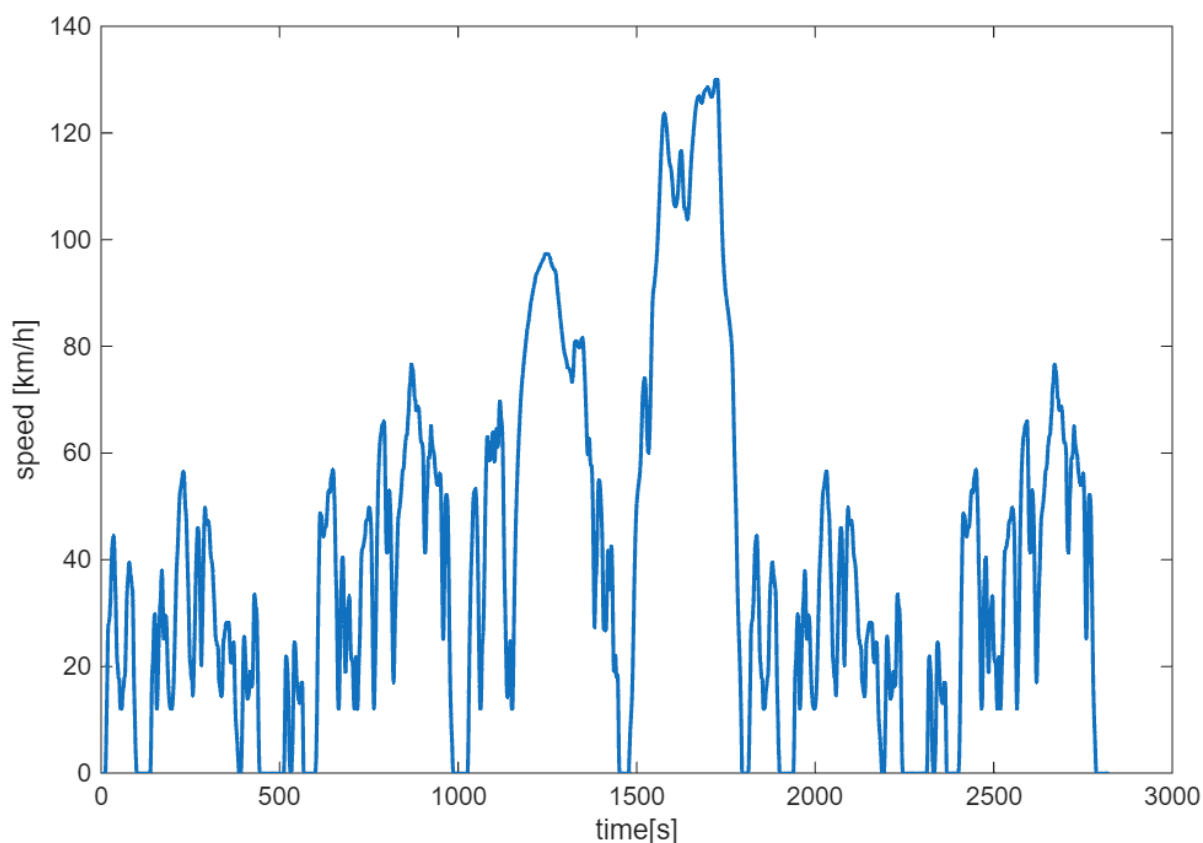


Figura 43 Costruzione del primo ciclo WLTC per veicoli elettrici col tool

Il ciclo mostrato è un ciclo base senza che vengano applicate modifiche dal tool; tuttavia durante il lavoro di tesi spesso è stato necessario lavorare con dei cicli modificati e in figura 44 viene mostrato

come varia il ciclo se la velocità massima del veicolo di cui si esegue la simulazione è limitato a 90 km/h.

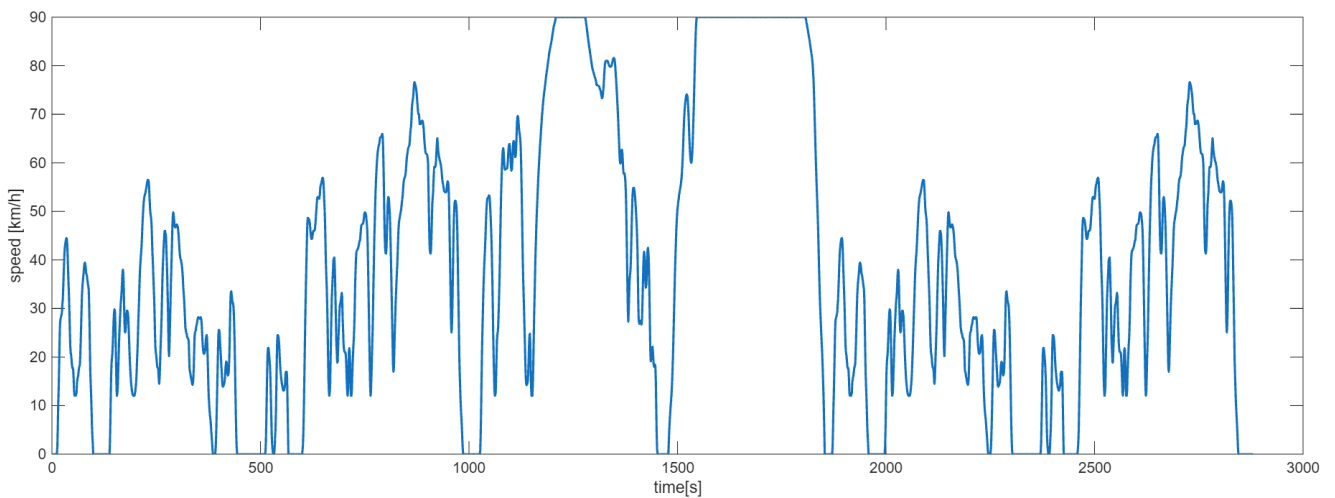


Figura 44 Costruzione del primo ciclo WLTC per veicoli BEV con velocità limitata a 90 km/h

Come si può vedere analizzando le figure 43 e 44, i cicli sono leggermente diversi, in particolare nel il ciclo base si hanno due picchi di velocità mentre nel ciclo modificato si ha un andamento a velocità massima costante per un periodo di lunghezza maggiore perché la distanza percorsa deve essere la stessa e questo comporta che il ciclo modificato risulta essere più lunga di circa 60 secondi rispetto al ciclo base.

Una volta completato questo primo ciclo WLTC il tool deve costruire una prima fase a velocità costante; ovviamente questo deve essere costruito rimanendo conforme alla normativa, di conseguenza il periodo di accelerazione con partenza da fermo deve durare al massimo 60 secondi e lo stesso vale per il periodo di decelerazione. Per quanto riguarda invece la lunghezza del tratto a velocità costante la normativa non impone limiti e non dà riferimenti, di conseguenza è particolarmente complesso tarare questo parametro senza invalidare la prova, poiché la normativa come detto precedentemente prevede che la prova venga annullata se al termine del secondo ciclo WLTC per veicoli elettrici la carica della batteria non è inferiore al 10% ma superiore allo 0%.

A questo punto è stato particolarmente complesso capire come strutturare il tool affinché riuscisse a seguire la normativa; in primo tentativo si è pensato di realizzare un tratto a velocità costante di una durata prefissata, sulla base di un'analisi dei risultati ottenuti durante molteplici test su diversi veicoli, in modo che fosse sufficientemente lungo da avvicinarsi ai risultati ottenuti sperimentalmente ma non abbastanza da scaricare completamente la batteria. Questa strategia inizialmente è sembrata un buon compromesso tra complessità di struttura del codice e adattabilità del tool su diversi veicoli, tuttavia in seguito è stata scartata poiché i risultati ottenuti sperimentalmente su veicoli diversi ma appartenenti alla stessa famiglia hanno mostrato risultati che cadono in un range troppo ampio e questo appesantiva eccessivamente la simulazione.

Si è quindi scelta una strada leggermente più complessa dal punto di vista di struttura del codice ma più stabile e intuitiva a livello logico; basandosi sui risultati della simulazione di un singolo ciclo WLTC per veicoli elettrici e confrontandoli con quelli sperimentali in nostro possesso, si è stimato quanta carica sia necessaria a un veicolo per completare un ciclo WLTC e la si è sommata al valore di 10% di batteria con la quale il veicolo deve terminare il secondo ciclo WLTC secondo normativa; da questo valore il tool esegue un ciclo iterativo costruendo il tratto a velocità costante e allungandolo fino a quando non si è soddisfatta la condizione di stop del ciclo stesso; in pratica il tool esegue un macro ciclo iterativo che controlla tutto il ciclo sin dal termine del primo ciclo WLTC, e al suo interno un micro ciclo iterativo necessario per costruire il tratto a velocità costante.

Una volta soddisfatta la condizione necessaria tale per cui il secondo ciclo WLTC termini con una batteria inferiore al 10% il ciclo iterativo si interrompe e il tool costruisce il secondo tratto a velocità costante che prosegue fino a quando la carica della batteria non risulta essere pari allo 0%, momento in cui la simulazione termina.

Dalla figura 45 alla 48 viene mostrato come il ciclo assuma lunghezze differenti in base alla velocità massima raggiungibile dal veicolo a parità di condizioni al contorno (massa, capacità del pacco batteria ecc...) oppure con la variazione di alcuni parametri, per esempio la variazione di massa, che è una condizione tipica per veicoli appartenenti alla stessa famiglia omologativa.

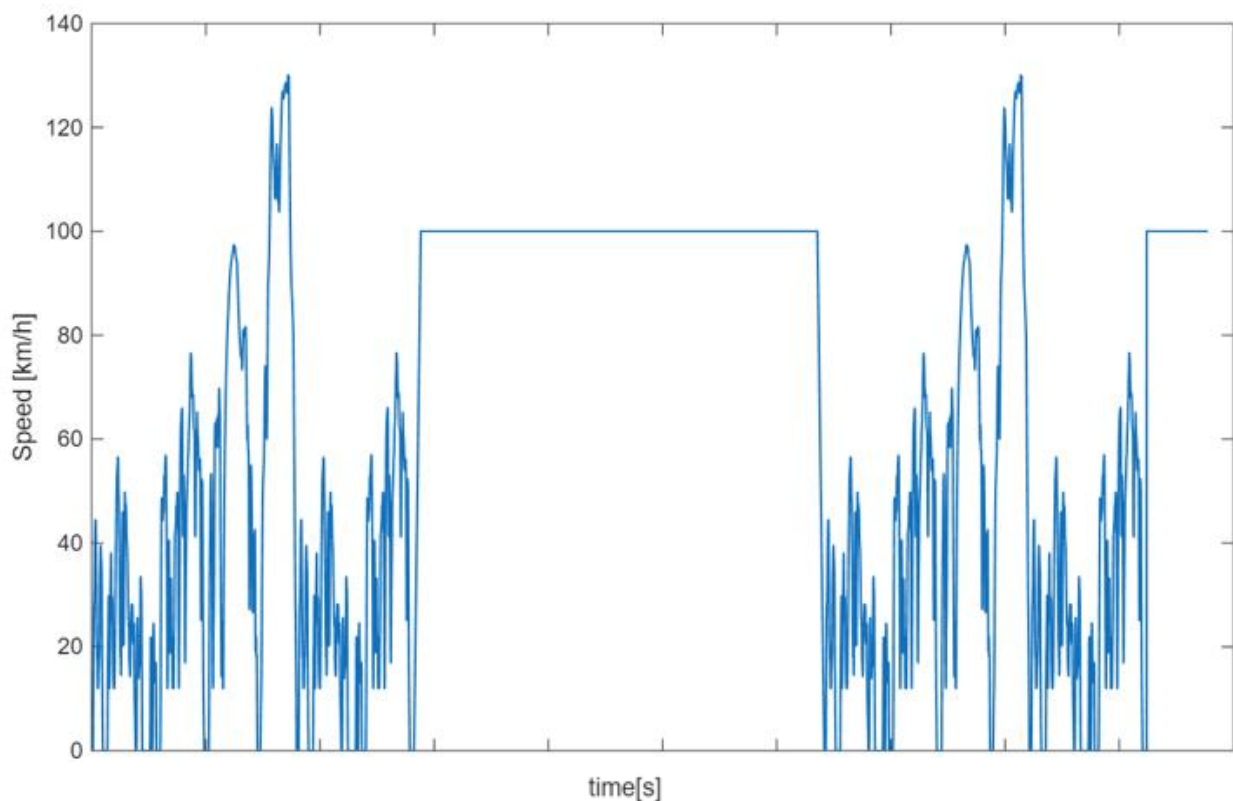


Figura 45 Ciclo omologativo completo con velocità nel tratto a velocità costante a 100 km/h

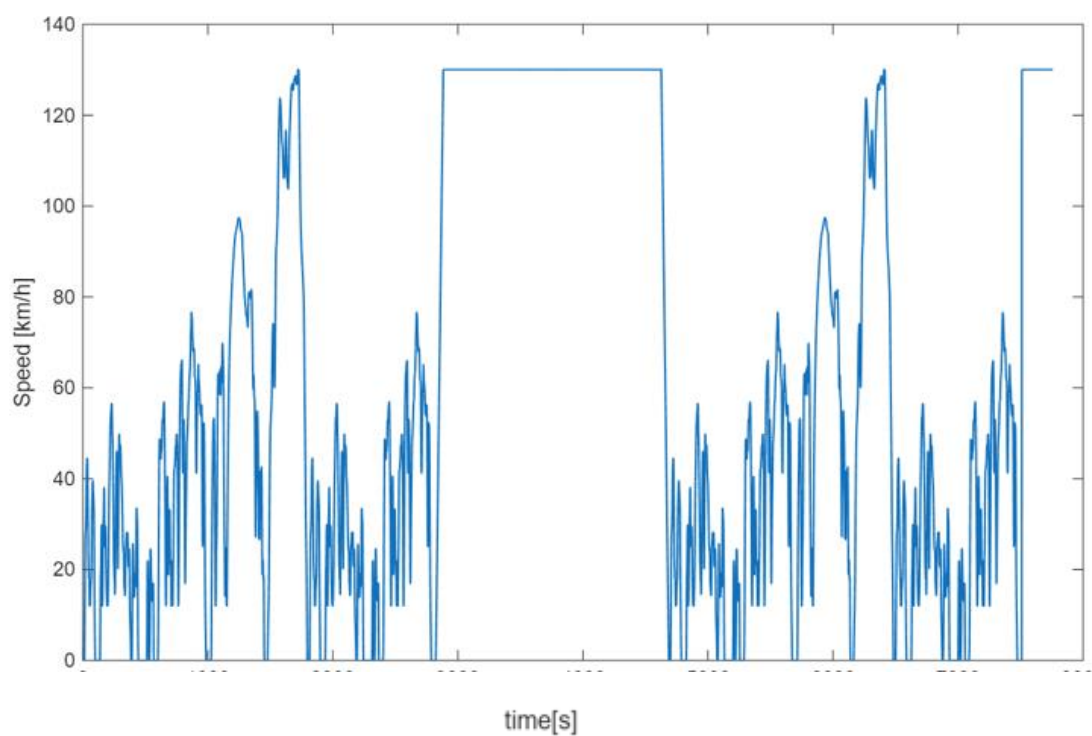


Figura 46 Ciclo omologativo completo con velocità nel tratto a velocità costante a 130 km/h

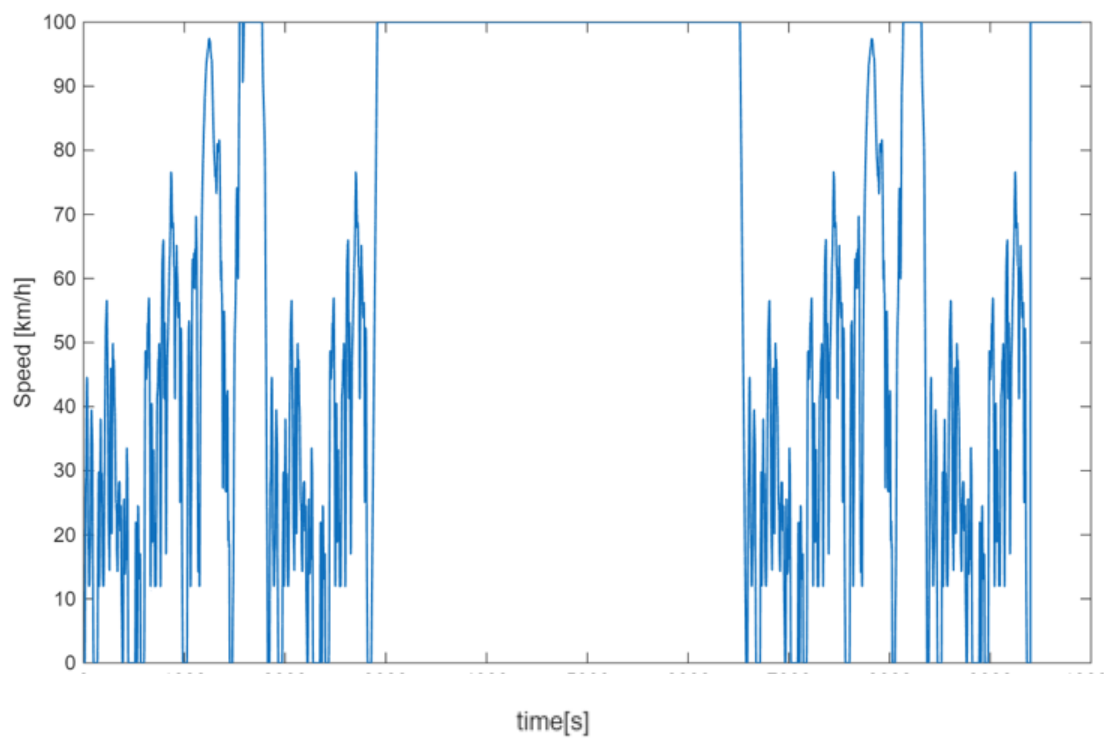


Figura 47 Ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 100 km/h

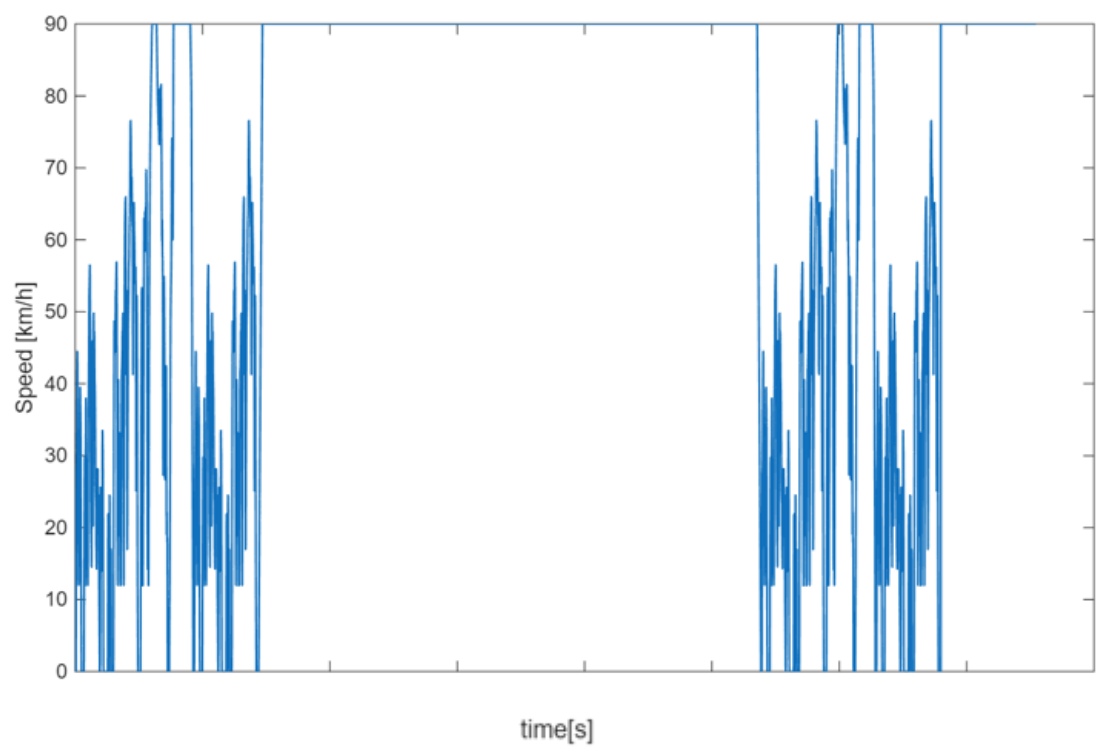


Figura 48 Ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 90 km/h e massa inferiore rispetto ai precedenti

I grafici mostrano in maniera chiara come possa variare la durata e la forma del ciclo per veicoli elettrici a seconda delle caratteristiche del veicolo.

6.4 Stima dello stato della batteria

Nei paragrafi precedenti si è potuto constatare quanto sia importante avere una stima realistica della carica della batteria lungo il ciclo simulativo e nei paragrafi precedenti si è sempre fatto riferimento alla dicitura “carica della batteria”; tuttavia il tool non utilizza esattamente questa informazione e in questo paragrafo viene approfondito il motivo e come venga stimato questo parametro dal tool.

Parlando di veicoli elettrici lo stato di carica della batteria viene comunemente riassunto con l’acronimo SOC (State of Charge) e rappresenta la percentuale di carica residua nella batteria come si è comunemente soliti intenderla (Prof. Rolando, 2025). Da un punto di vista matematico questo parametro può essere calcolato in due maniere:

$$- \quad SOC(t) = \frac{C(t)}{C_{nom}}; \quad (17)$$

$$- \quad SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_0^t I(t)dt}{C_{nom}}. \quad (18)$$

Dove:

- $C(t)$ è la capacità nell’istante di tempo considerato, calcolato anche come l’integrale della corrente nel tempo;
- C_{nom} è la capacità nominale della batteria.
- SOC_0 è lo stato di carica iniziale della batteria, tipicamente rappresenta la carica massima della batteria.

Per ottenere i valori di corrente e tensione in maniera dinamica bisogna ricorrere a dei modelli matematici per simulare la scarica della batteria, tuttavia questi modelli per ottenere dei dati solidi necessitano di essere integrati con un modello che simuli il comportamento della vettura in maniera molto più complessa di quella prevista dal tool e che esula dallo scopo richiesto, anche per la complessità di realizzazione.

Di conseguenza il tool come facilmente intuibile non utilizza il SOC come parametro di controllo, ma utilizza un parametro analogo ma molto più semplice da gestire da un punto di vista di modellazione, ovvero il SOE (State of Energy). Questo parametro rappresenta lo stato di energia presente all’interno della batteria e può essere calcolato nel seguente modo (Prof. Rolando, 2025):

$$- \quad SOE(t) = \frac{E(t)}{E_{nom}}; \quad (19)$$

$$- \quad SOE(t) = SOE_0 - \frac{\int_0^t V(t) \times I(t)dt}{E_{nom}} \quad (20)$$

Dove:

- $E(t)$ è l’energia nell’istante di tempo considerato, calcolata anche come l’integrale nel tempo della tensione moltiplicata per la corrente;
- E_{nom} è l’energia nominale che la batteria può contenere, calcolata anche come la capacità nominale della batteria per la tensione calcolata a circuito aperto.

Questo parametro è molto più semplice da integrare in un tool come quello realizzato, infatti l’energia consumata per spostare il veicolo può essere calcolata dal tool come l’integrale della potenza nel

tempo e partendo da una situazione di $SOE_0 = 100\%$ si può facilmente verificare come la quantità di energia immagazzinata nella batteria diminuisca lungo il ciclo fino a raggiungere lo 0%. Di fatto è un parametro analogo al SOC ed è un parametro largamente utilizzato per la stima della carica della batteria.

Nelle figure 49 e 50 viene mostrato come avviene indicativamente la scarica della batteria lungo un singolo ciclo WLTC per veicoli elettrici e se questa venga influenzata in maniera sensibile dalla massima velocità raggiungibile dal veicolo lungo il singolo ciclo.

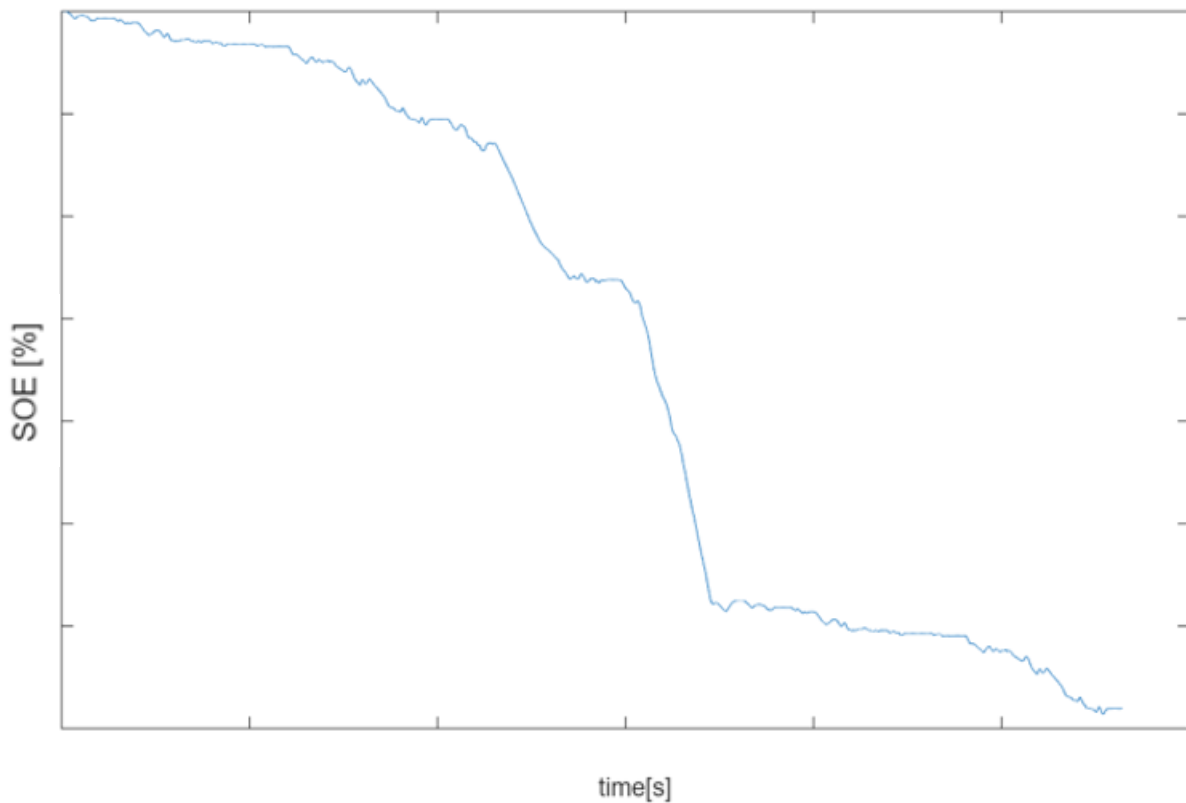


Figura 49 Andamento SOE lungo il primo ciclo con veicolo che è in grado di seguire il ciclo senza limitazioni

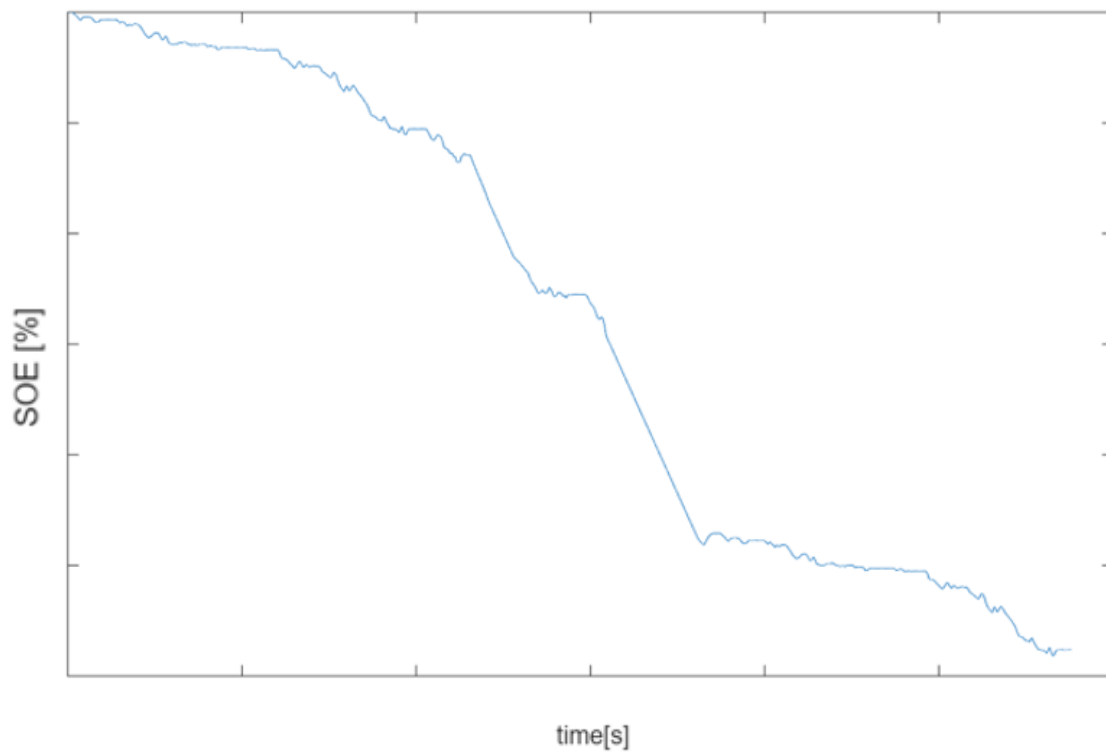


Figura 50 Andamento SOE lungo il primo ciclo con veicolo limitato a 90 km/h

È possibile notare come a parità di condizioni al contorno un veicolo che raggiunge velocità massime superiori scarichi maggiormente la batteria lungo il ciclo di circa un 2%, pur percorrendo la stessa distanza come previsto dalla normativa.

Nelle figure 51,52,53,54 viene mostrato come avviene la scarica della batteria lungo il ciclo e come questa venga influenzata dalla velocità massima a parità di condizioni al contorno e a parità di velocità massima raggiungibile ma cambiando alcuni parametri come la massa, come fatto nel paragrafo precedente per la variazione del ciclo.

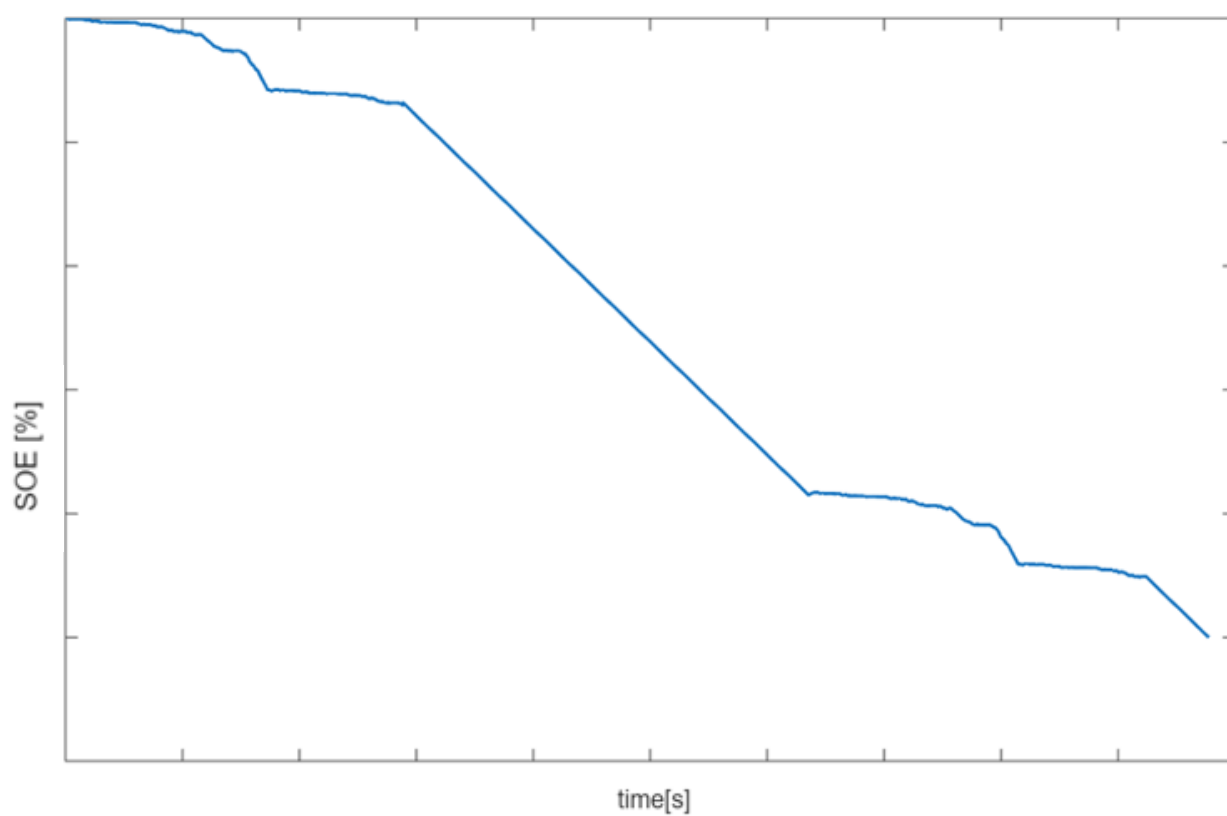


Figura 51 Andamento SOE lungo il ciclo omologativo completo senza limitazioni e percorrendo il tratto a velocità costante a 100 km/h

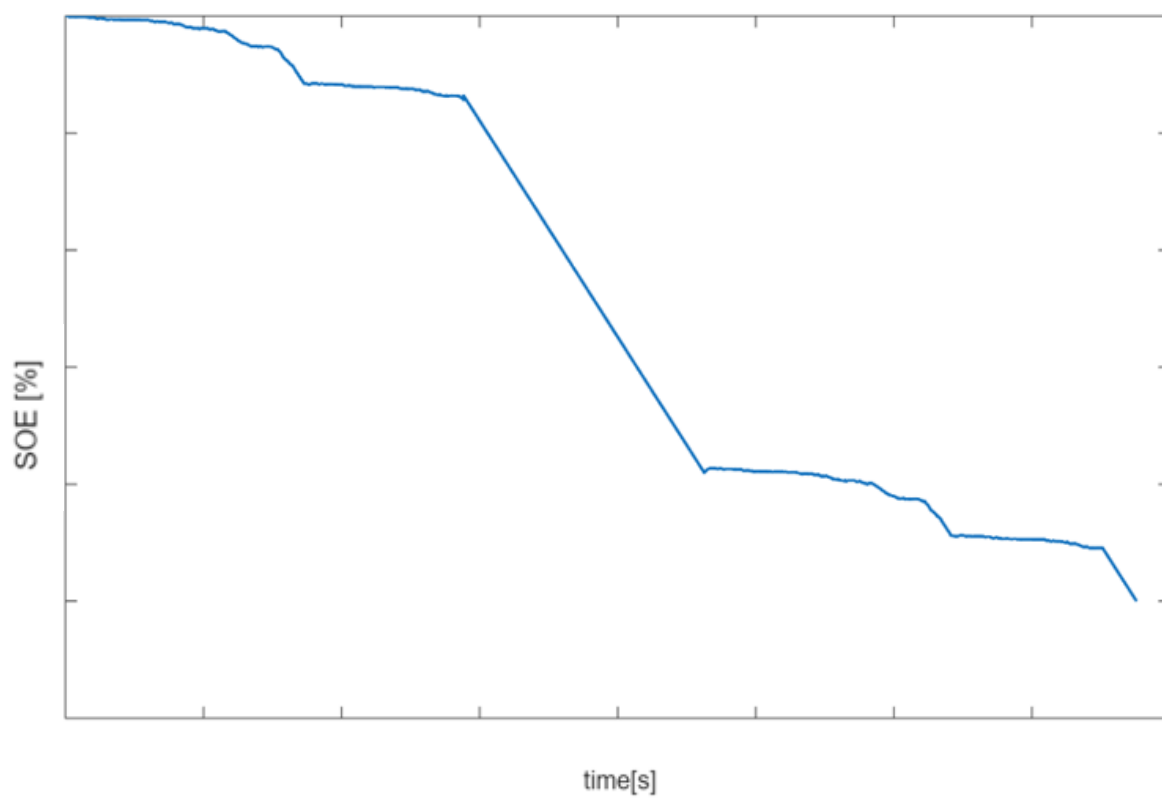


Figura 52 Andamento SOE lungo il ciclo omologativo completo senza limitazioni e percorrendo il tratto a velocità costante a 130 km/h

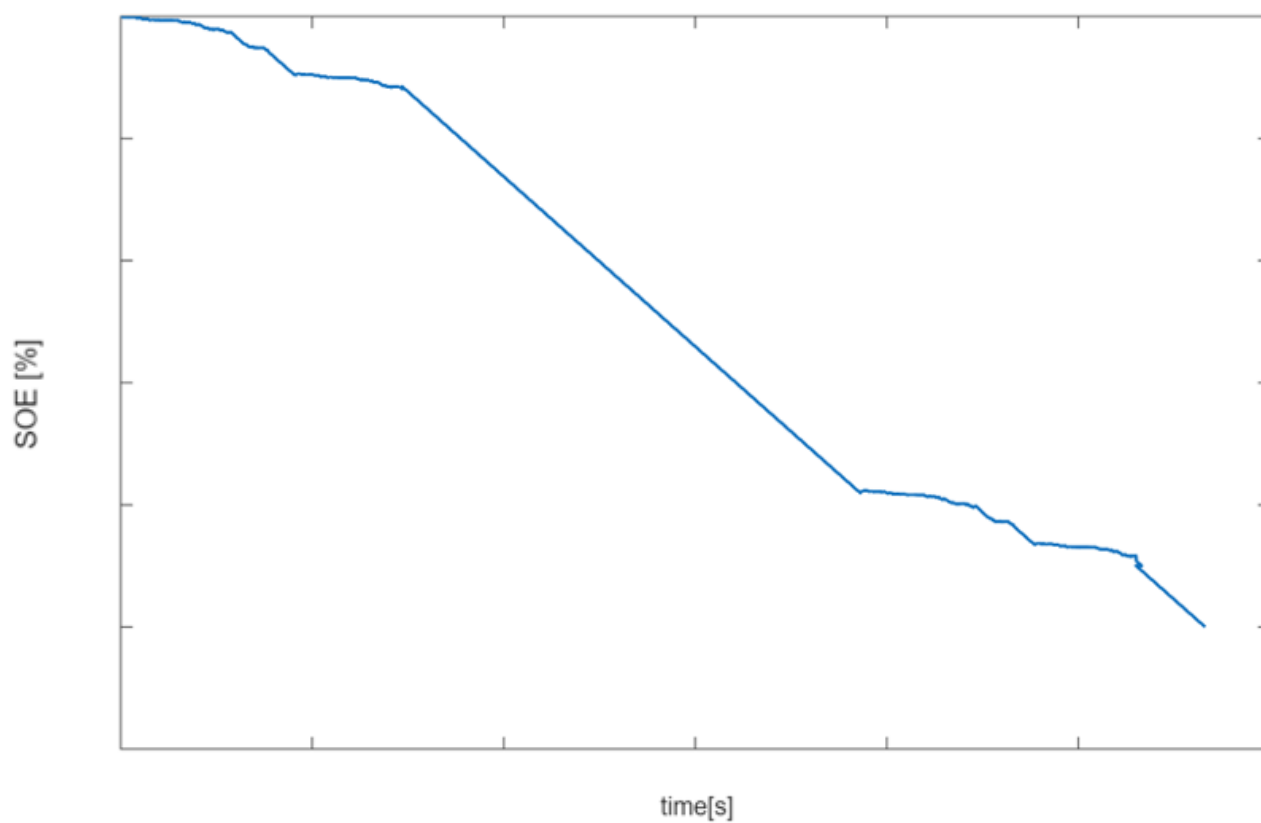


Figura 53 Andamento SOE lungo il ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 90 km/h

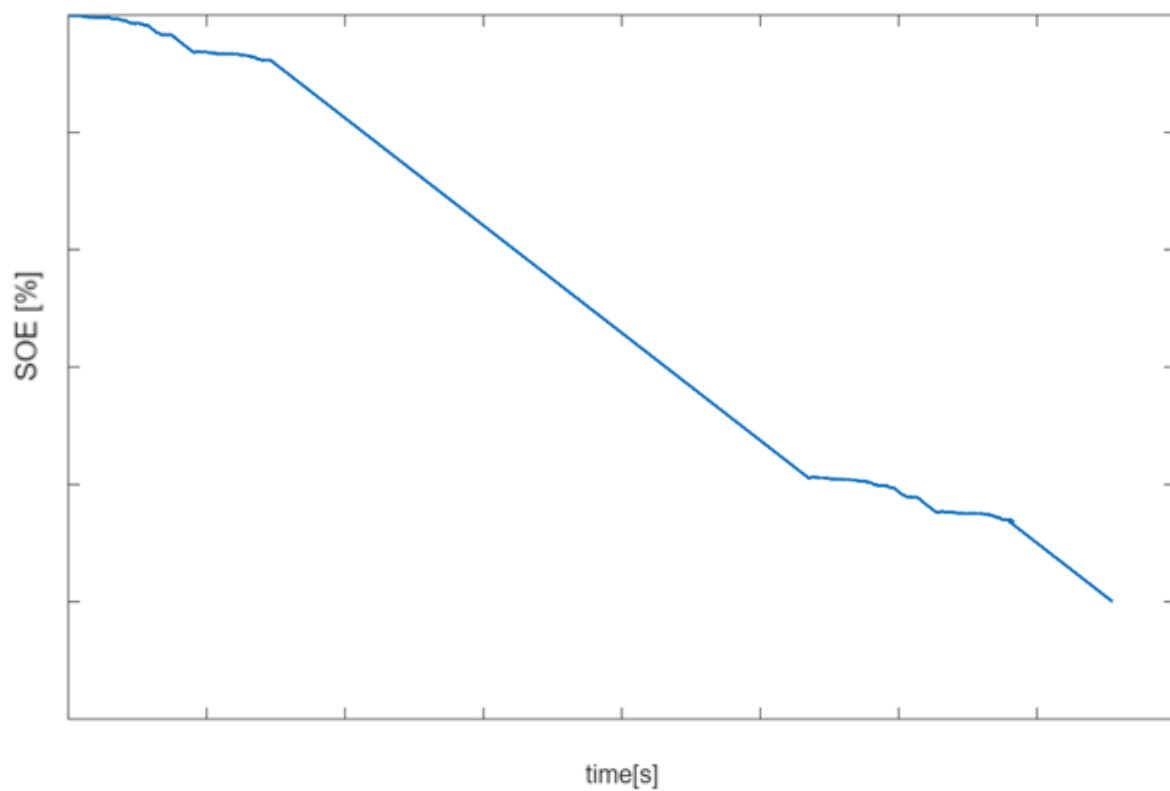


Figura 54 Andamento SOE lungo il ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 90 km/h e massa minore rispetto al precedente

Come si può notare dal confronto dei due grafici visibili in figura 51 e 52 un aumento della velocità mantenuta durante il tratto costante rende molto più verticale la scarica della batteria; invece la variazione del peso a parità di velocità mantenuta lungo il tratto a velocità costante non incide a livello visivo in maniera così impattante sulla pendenza della curva di scarica, tuttavia confrontandole si può notare che la scarica del veicolo con un peso minore richiede percorrenze significativamente maggiori.

6.5 Confronto tra potenze

Nel paragrafo precedente si è visto come uno dei parametri principali per il funzionamento della simulazione sia il SOE che è direttamente dipendente dalla potenza necessaria per l'avanzamento del veicolo lungo il ciclo; risulta evidente dunque come un confronto tra le potenze per veicoli differenti aiuti a capire come mai vi sia una scarica differente della batteria; inoltre un altro scopo di questo lavoro di tesi è quello di capire se è possibile definire un fattore correttivo universale per rendere le potenze simulate uguali a quelle sperimentali con un livello di tolleranza minimo.

Inizialmente come è stato fatto in precedenza viene proposto un confronto tra le potenze utilizzate lungo il ciclo per un veicolo in grado di raggiungere velocità massime differenti a parità di condizioni al contorno; nelle figure 55 e 56 è visibile il confronto.

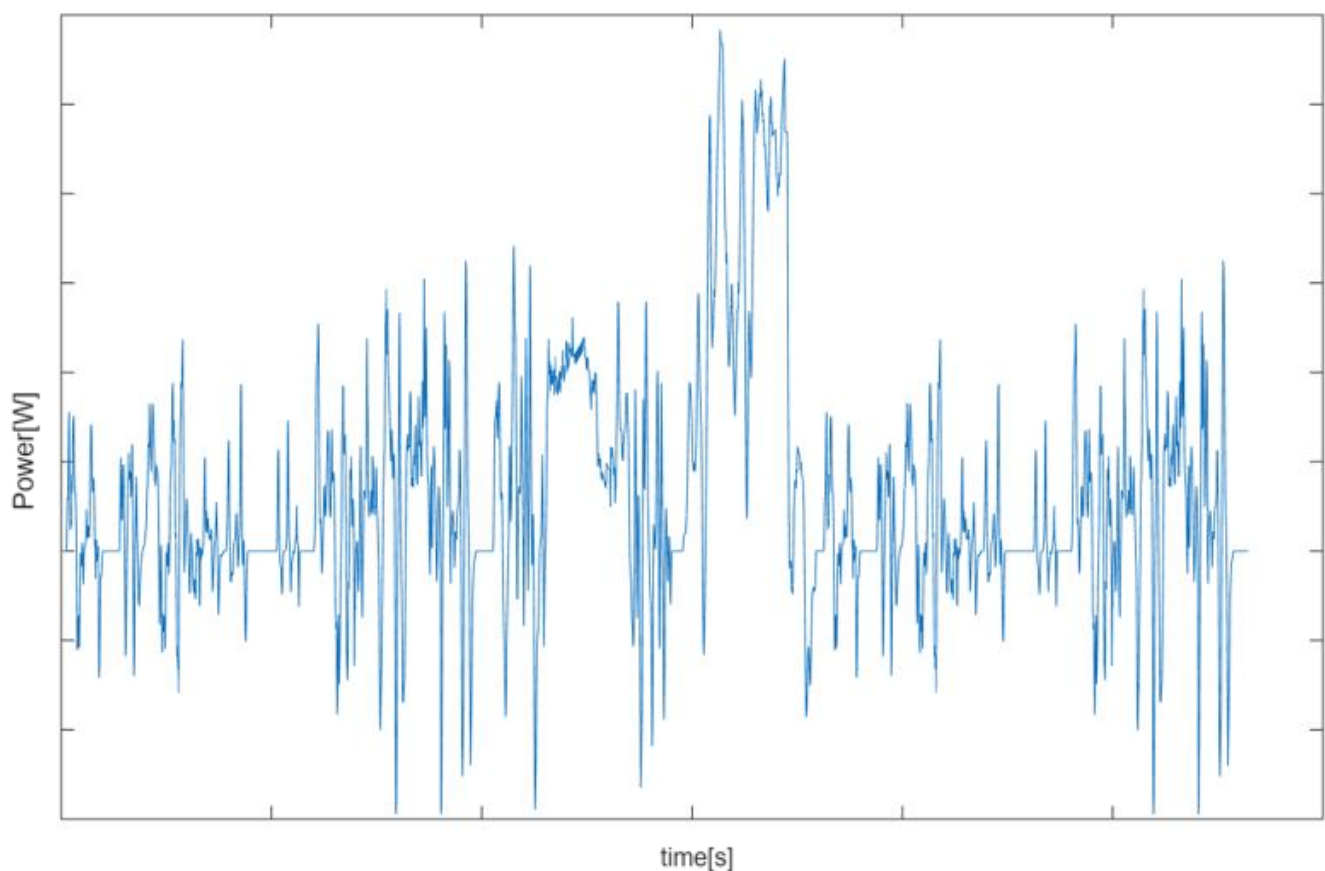


Figura 55 Potenze lungo il primo ciclo WLTC per BEV senza restrizioni

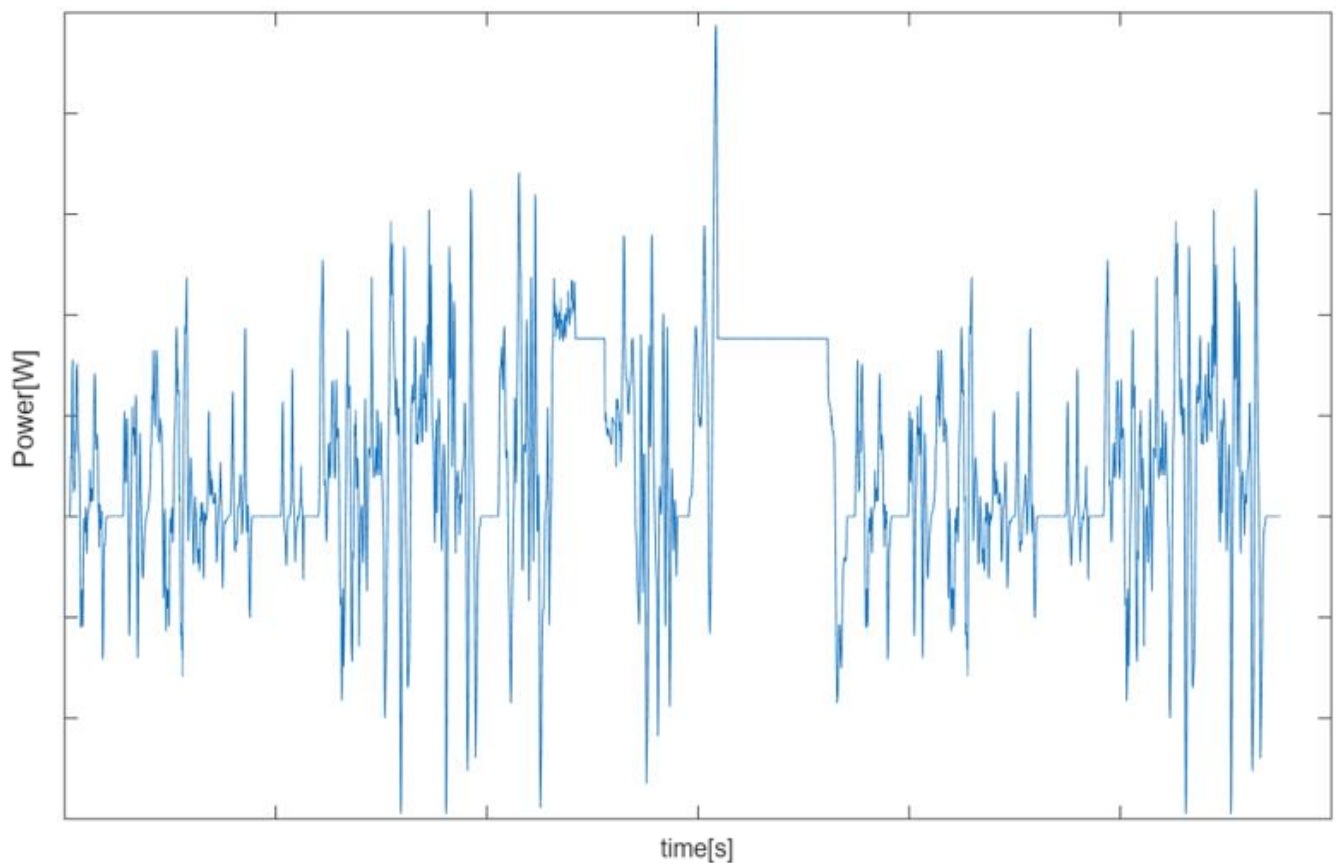


Figura 56 Potenze lungo il primo ciclo WLTC per BEV con velocità massima di 90 km/h

Come facilmente prevedibile lungo il ciclo l'andamento delle potenze è identico a meno della fase extra-high dove il veicolo che raggiunge velocità superiori richiede una potenza maggiore, il che vista la durata di questa fase spiega in maniera coerente perché si abbia una scarica della batteria differente di solo qualche punto percentuale.

Vengono ora proposti i medesimi confronti proposti nei paragrafi precedenti per vedere come vari la potenza lungo il ciclo intero.

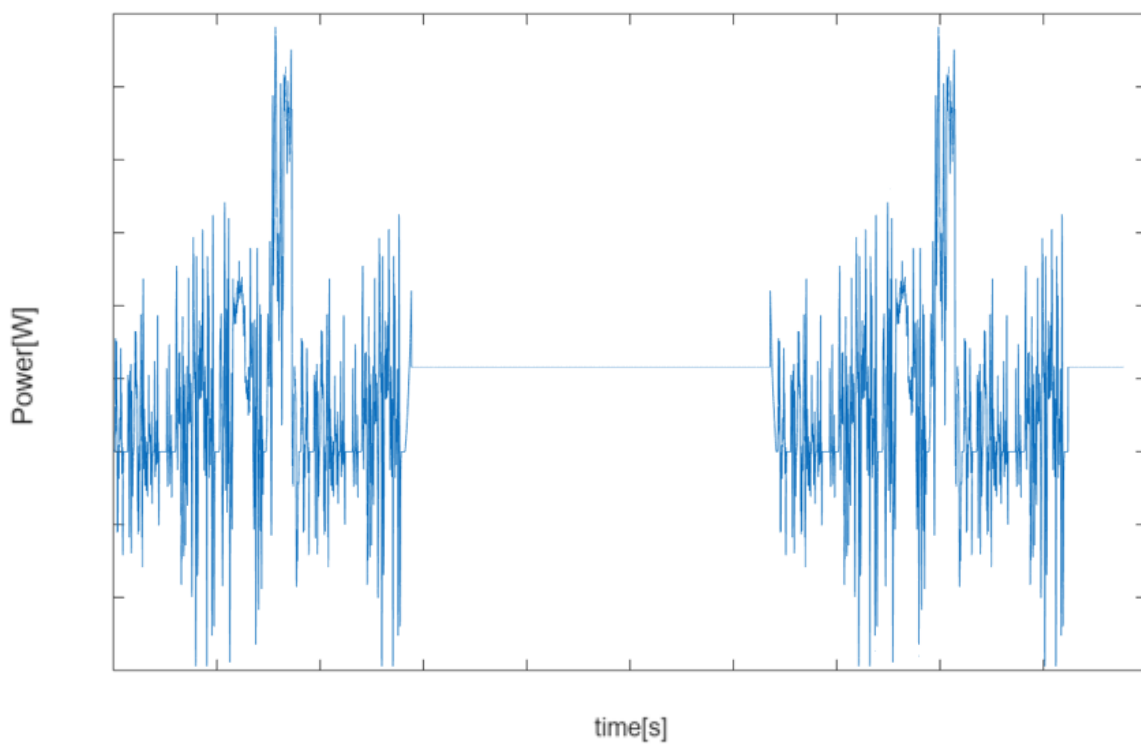


Figura 57 Andamento potenze lungo un ciclo omologativo completo senza limitazioni e percorrendo i tratti a velocità costante a 100 km/h

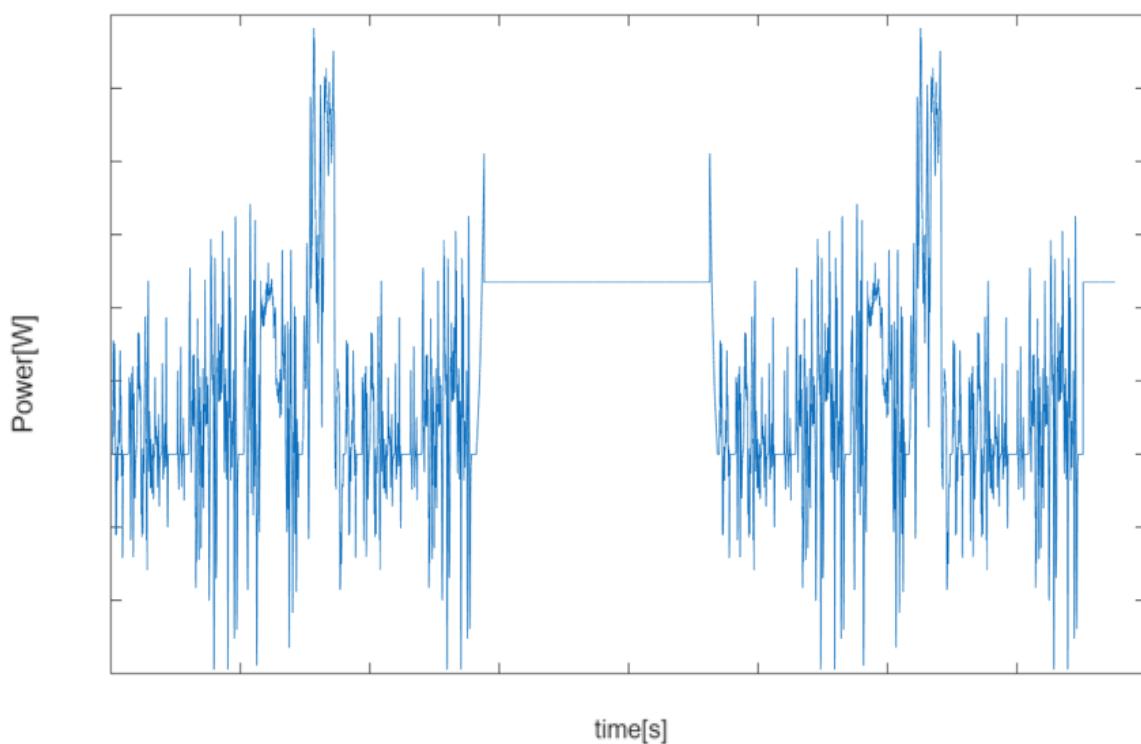


Figura 58 Andamento potenze lungo un ciclo omologativo completo senza limitazioni e percorrendo i tratti a velocità costante a 130 km/h

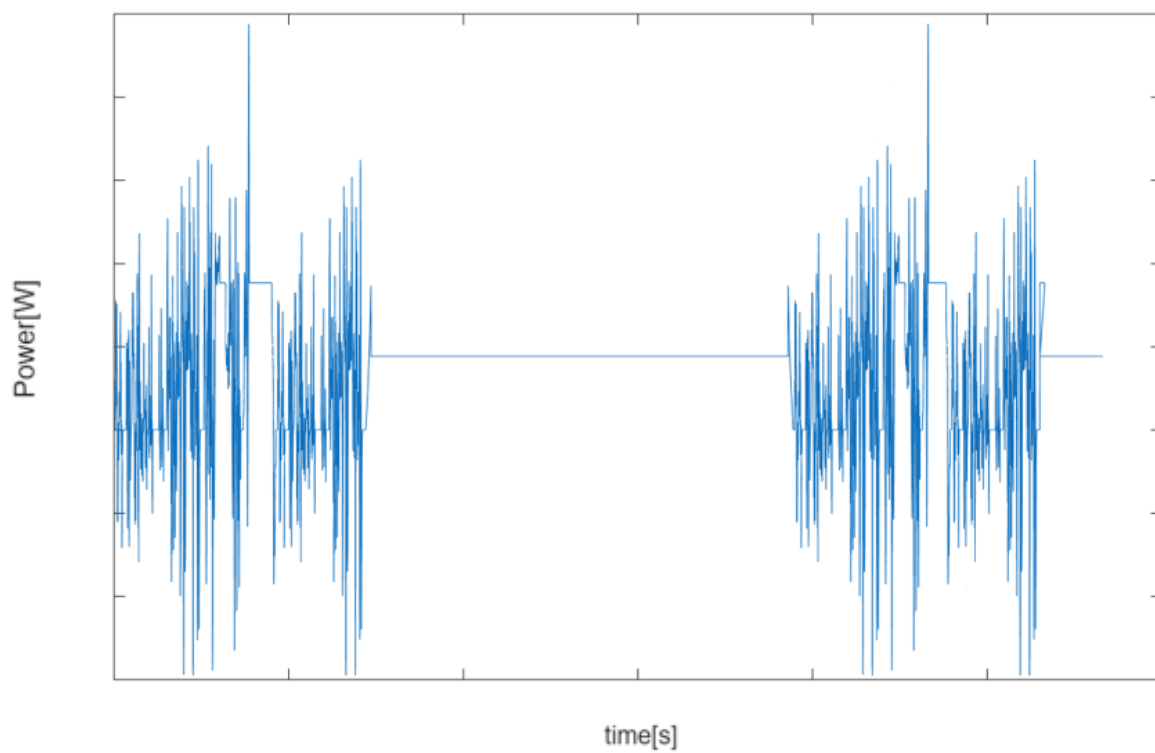


Figura 59 Andamento potenze lungo un ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 90 km/h

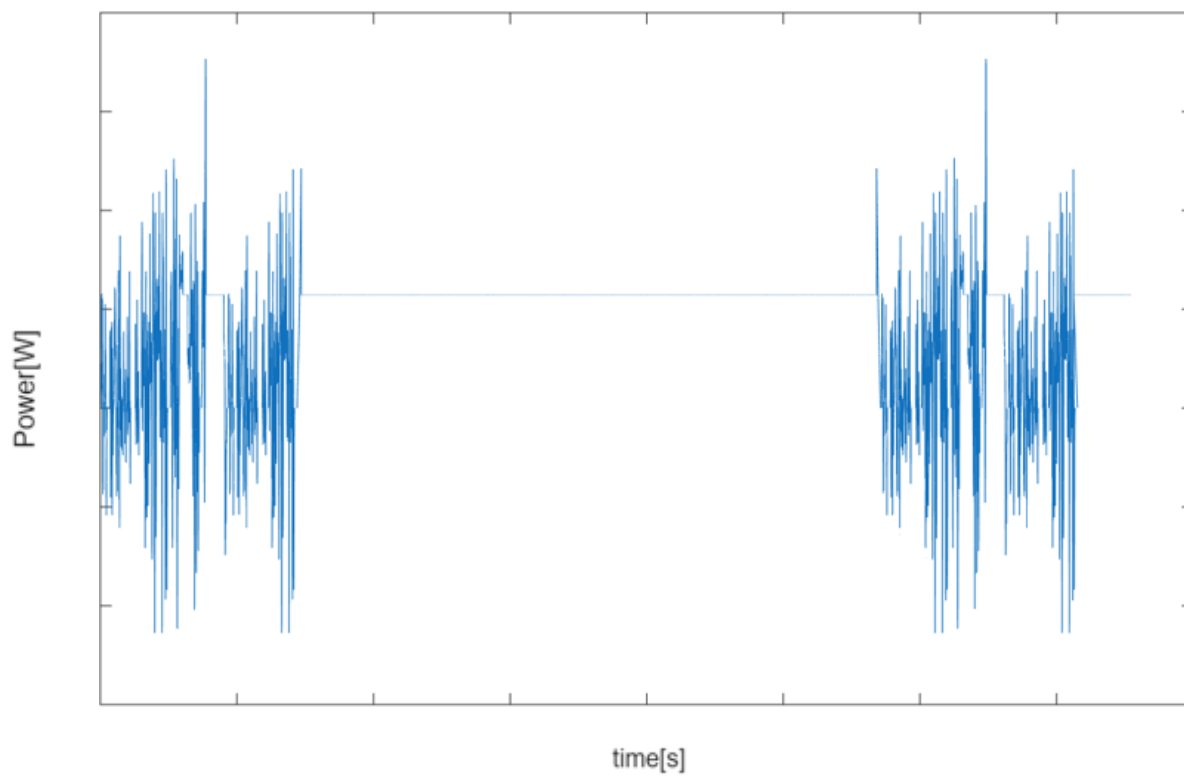


Figura 60 Andamento potenze lungo un ciclo omologativo completo con velocità massima del veicolo di 90 km/h e massa minore rispetto ai veicoli precedenti

Nonostante l'assenza dell'asse delle y renda difficile confrontare direttamente i grafici, i risultati ci restituiscono l'andamento che ci si aspetta, ovvero una riduzione della potenza con il diminuire della velocità da mantenere durante il tratto a velocità a costante e con la riduzione della massa.

Questi valori in termini di potenza e durata della batteria hanno però poco interesse se non sono messi a paragone con quanto rilevato a livello sperimentale; per questo motivo vengono ora proposti dei grafici che mostrano un confronto tra i valori di potenza calcolati tramite il tool e quelli invece rilevati sperimentalmente. I grafici che vengono mostrati nelle figure 61 e 62 sono i risultati di due veicoli appartenenti alla stessa famiglia omologativa ma con le caratteristiche agli estremi opposti della stessa.

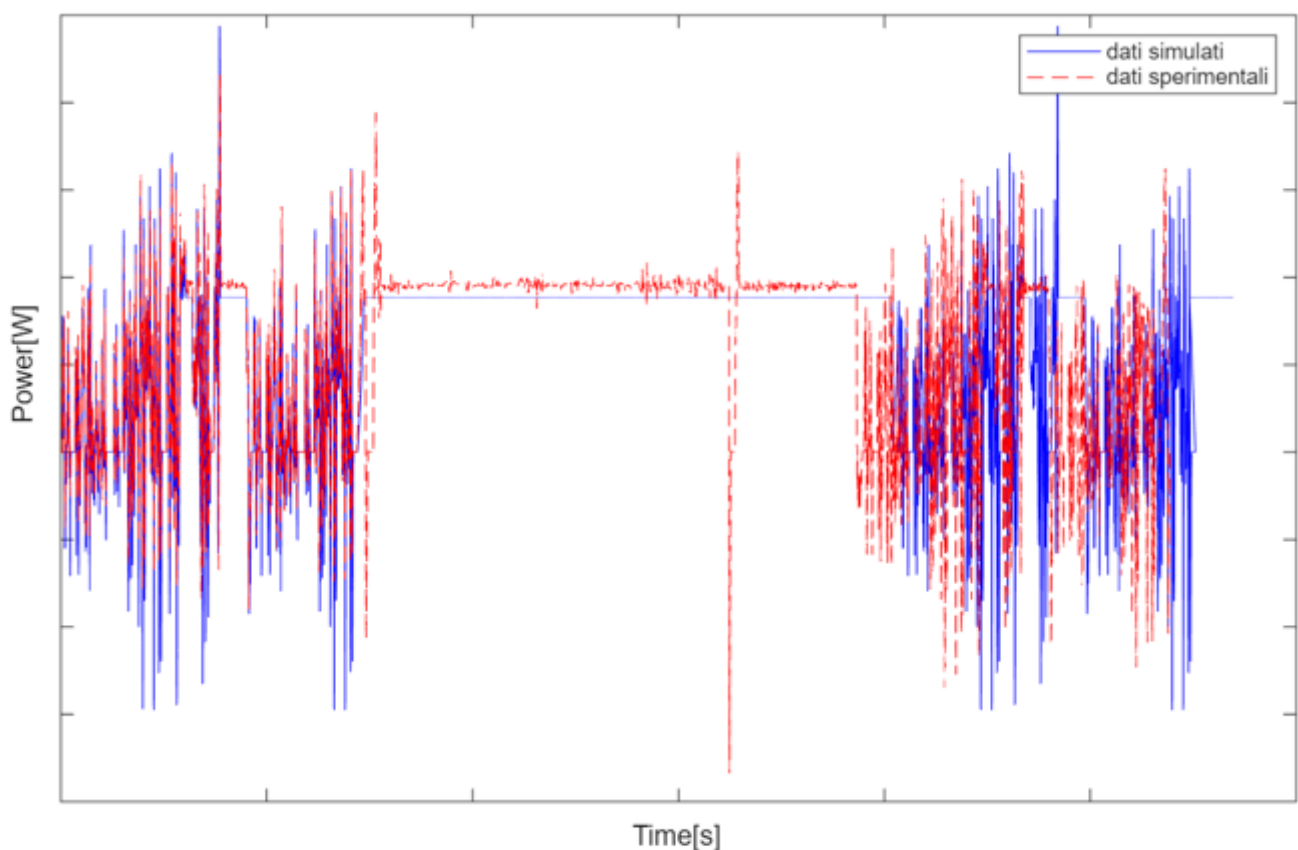


Figura 61 Confronto tra dati sperimentali e simulati. Veicolo 1

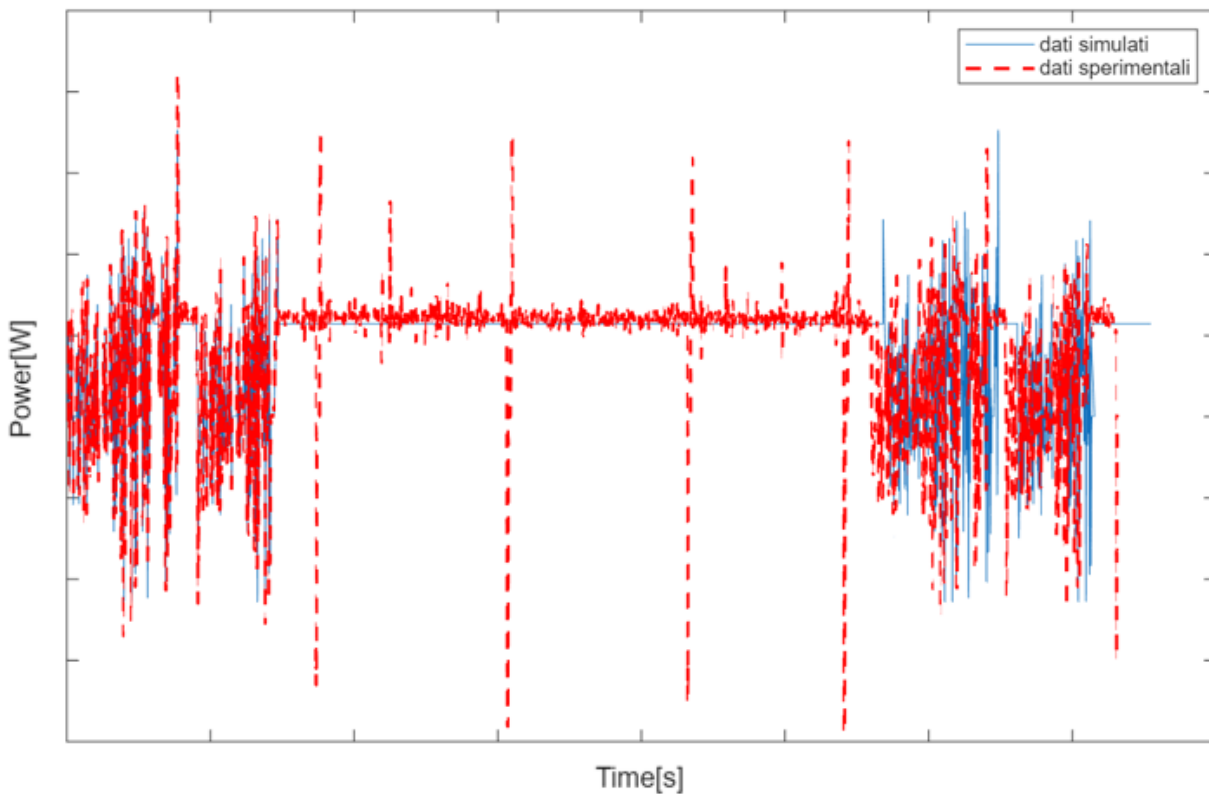


Figura 62 Confronto tra dati sperimentali e simulati. Veicolo 2

Analizzando i dati, come facilmente prevedibile si nota che i valori di potenza ottenuti tramite il tool sono leggermente più bassi rispetto a quelli riscontrati coi test sperimentali, questo perché la simulazione non è in grado di tenere conto di alcuni fattori che vanno a incidere sul mondo reale, tuttavia l'approssimazione è sufficientemente buona, con uno scarto per entrambi i veicoli nel tratto a velocità costante di circa il 3%. Questo ovviamente porta ad avere dei risultati anche di scarica leggermente migliori rispetto a quelli che si ottengono nel mondo reale, tuttavia andando a confrontare i risultati numerici, pur senza applicare nessun fattore correttivo, si nota che la causa principale della discrepanza in termini di durata del test è il secondo tratto a velocità costante, mentre fino a quella fase del test la simulazione dà dei buoni riscontri con quanto ottenuto sperimentalmente.

A questo punto, essendo l'errore registrato tra i valori sperimentali e quelli simulati lo stesso per entrambi i veicoli nel tratto a velocità costante, viene mostrato come cambiano i valori della simulazione applicando lo stesso fattore correttivo a entrambi i veicoli.

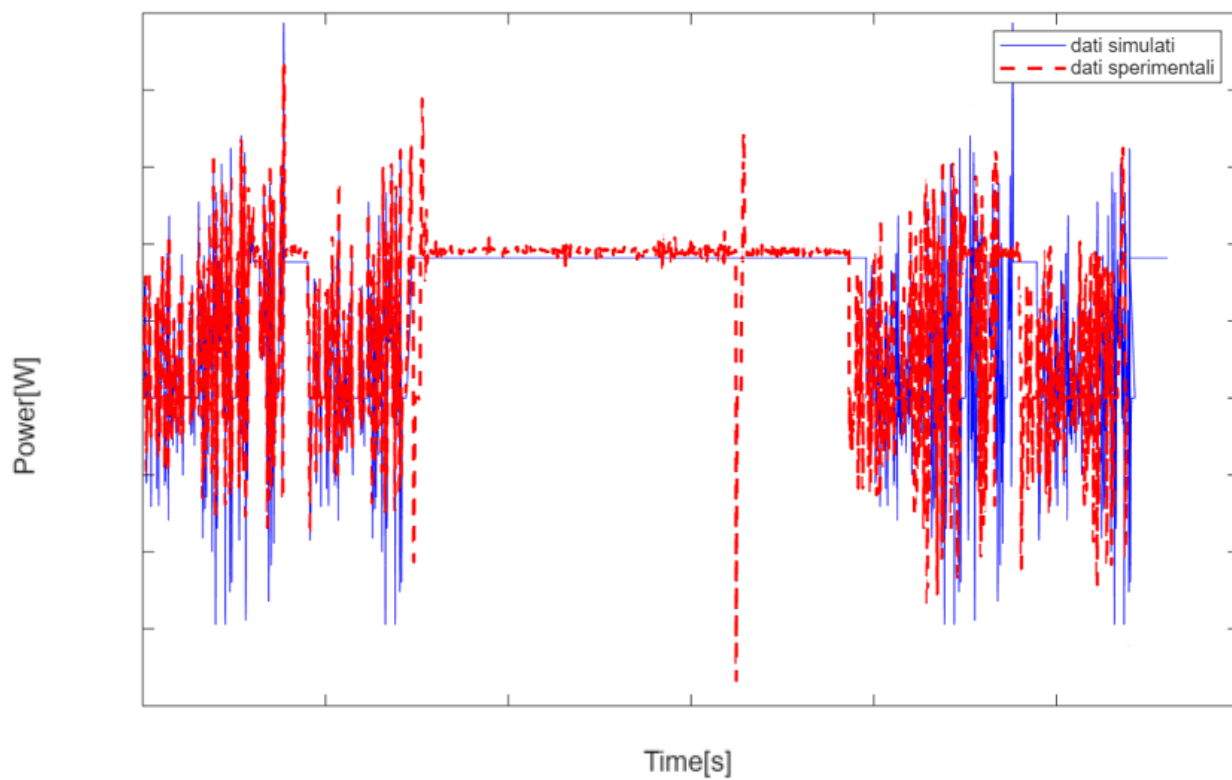


Figura 63 Confronto tra dati sperimentali e simulati dopo l'applicazione di un fattore correttivo. Veicolo 1

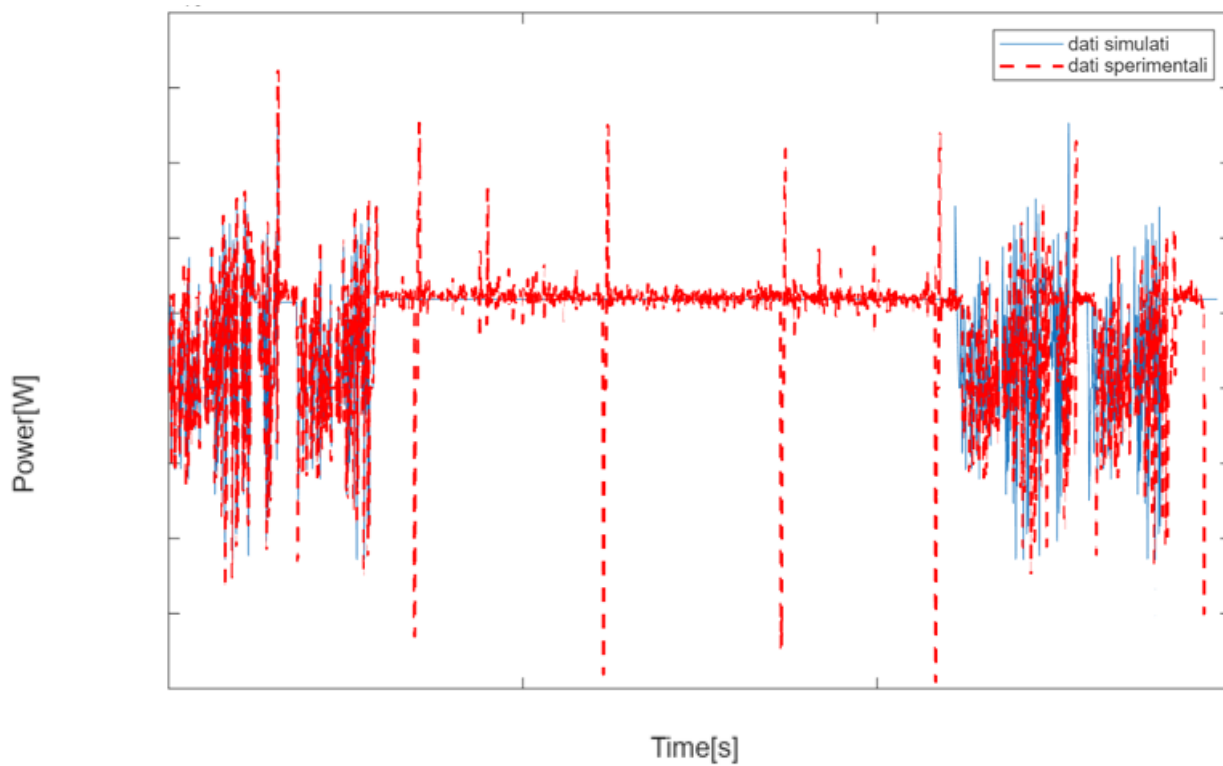


Figura 64 Confronto tra dati sperimentali e simulati dopo l'applicazione di un fattore correttivo. Veicolo 2

Come si può vedere dai risultati dopo l'applicazione di un fattore correttivo per entrambi i casi si ha un allineamento ulteriore tra i risultati ottenuti dalla simulazione e quelli ottenuti per via sperimentale.

7. Possibili aspetti futuri

Nel capitolo precedente si è visto come i risultati ottenuti tramite l'utilizzo del tool siano abbastanza correlati con i risultati ottenuti sperimentalmente, soprattutto dopo che è stato applicato un fattore correttivo al valore di potenza lungo il tratto a velocità costante; tuttavia i risultati ottenuti sono soltanto parziali, per poter validare questo fattore correttivo e affermare che sia applicabile universalmente, ci sarebbe bisogno di un numero di test sperimentali con cui fare il confronto decisamente superiore di cui purtroppo non è stato possibile usufruire durante il progetto di questa tesi; di conseguenza un possibile sviluppo del tool potrebbe essere quello di confrontare i risultati ottenuti con un campione maggiore di test sperimentali e verificare che le discrepanze rimangano nell'intorno del valore ottenuto per questi primi risultati.

Generalmente potrebbe essere molto complesso raggiungere una convergenza verso un unico valore di errore, infatti anche i risultati ottenuti sperimentalmente variano in un range piuttosto ampio di valori anche se viene testato lo stesso veicolo e questo è dovuto al fatto che possono cambiare seppur in maniera minima le condizioni ambiente o il banco su cui viene testato il veicolo e questo porta a ottenere risultati differenti, tuttavia questi primi risultati ottenuti durante questo progetto non escludono la possibilità che ciò possa avvenire.

Inoltre un possibile aspetto futuro per lo sviluppo del tool potrebbe essere quello di affiancargli un modello in grado di simulare fedelmente il comportamento della batteria in modo da avere dei risultati ancora più affidabili.

Bibliografia e Sitografia

- Acar, C., & Dincer, I. (2020). The potential role of hydrogen as a sustainable transportation fuel to combat global warming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 3396-3406. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.10.149
- Arrhenius, S. (1896, Aprile). XXXI. On the influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. 41, 237-276.
- Beddows, D. C., & Harrison, R. M. (2021, Gennaio 1). PM10 and PM2.5 emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles. *Atmospheric Environment*, 244. doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117886
- Cavelius, P., Engelhart-Straub, S., Norbert, M., Lercher, J., Awad, D., & Bruck, T. (2023, Marzo 30). The potential of biofuels from first to fourth generation. *Plos Biology*. doi:10.1371/journal.pbio.3002063
- CEE. (1991). Direttiva 91/441/CEE., (p. 106).
- Cherwoo, L., Gupta, I., Flora, G., Verma, R., Kapil, M., Arya, K. S., . . . Ashokkumar, V. (2023, Dicembre). Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: a comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60. doi:10.1016/j.seta.2023.103503
- EEA. (2018). *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives*. doi:10.2800/77428
- Ehsani, M., Veer Singh, K., Om Bansal, H., & Mehrjadi, R. T. (2021). State of the Art and Trends in Electric and Hybrid Electric Vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 109(6), 967-984. doi:10.1109/JPROC.2021.3072788
- EPA. (2025, Marzo 31). *Transportation Sector Emissions* . Tratto da EPA: <https://www.epa.gov/ghgemissions/transportation-sector-emissions>
- Falduto, C. (2021, Novembre 2). *COP: Breve guida alle conferenze sul clima, da Kyoto a oggi*. Tratto da duegradi: <https://www.duegradi.eu/news/conferenze-clima/>
- Grimaldi, F. M., & Capaldi, P. (2024). The effectiveness of HEVs Phase-out by 2035 in Favor of BEVs with Respect to the production of CO2 Emissions. *Energies*, 17(4), 961. doi:10.3390/en17040961
- IEA. (2023). *CO2 emissions in 2023*. Tratto il giorno Agosto 23, 2025 da IEA, Paris: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>
- IEA. (2024). *Global EV Outlook*. Tratto il giorno Agosto 19, 2025 da IEA, Paris: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>

- IEA. (2025). *Oil 2025, Executive summary*. Tratto il giorno Agosto 19, 2025 da IEA, Paris:
<https://www.iea.org/reports/oil-2025/executive-summary>
- Jaramillo, P. S. (2022). Transport. (J. R. P.R. Shukla, A cura di) *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. doi:10.1017/9781009157926.012
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens III, W. W. (1972). *The limits to growth*. New York : Universe Books.
- Nandola, Y., Krishna, U., Pramanik, S., Himabindu, M., & Ravikrishna, R. (2025, Giugno 1). Impact of electrification on two-wheelers in India from the perspective of well-to-wheel energy efficiency and CO2 emissions. *Energy*, 324.
doi:10.1016/j.energy.2025.135911
- Prof. Millo, F. (2025). Slides corso Motori a combustione interna .
- Prof. Rolando, L. (2025). Slides corso Hybrid and Electric propulsion systems.
- Prof. Spessa, E. (2023). Slides corso Controllo delle emissioni di inquinanti .
- Prof. Vaschetto, S. (2025). Slides corso Hybrid and Electric propulsion systems.
- R.P.W.M. Jacobs, M. G. (1988). *The Greenhouse Effect*. HSE. Tratto da ClimateFiles.
- RAC. (2025). *Euro 1 to Euro 7 guide - find out your vehicle's emissions standard*. Tratto il giorno Agosto 22, 2025 da RAC: <https://www.rac.co.uk/drive/advice/emissions/euro-emissions-standards/>
- UNECE. (2021). *Regolamento ONU n. 154*.
- Yang, A., Liu, C., Yang, D., & Lu, C. (2023). Electric vehicle adoption in a mature market: A case study of Norway. *Journal of Transport Geography*, 106.
doi:10.1016/j.jtrangeo.2022.103489