POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi Magistrale

Attrattività economica di veicoli elettrificati: comparazione tra architetture ibride plug-in ed auto elettriche mediante simulazione su cicli guida convenzionali e reali

Relatore:

Prof. Bruno Dalla Chiara

Correlatore:

Prof. Ezio Spessa

Candidato:

Valerio Grilletti

s265672

Dicembre 2021

INDICE

Sommario

Ringraziamenti ... 5
Glossario ... 6
ABSTRACT ... 7
1. Introduzione ... 9
2. I veicoli a basse emissioni di inquinanti ... 11
3. Il mercato attuale dei veicoli BEV e PHEV ... 16
4. BEV o PHEV? ... 21
5. Le architetture PHEV ... 31
6. Modello del veicolo e software HEVBox ... 34
7. Analisi dei costi di produzione di un PHEV ... 38
7.1 Costi fissi ... 38
8. Analisi del costo operativo di un veicolo PHEV ... 45
8.1 Cicli guida ... 46
8.1.1 Ciclo WLTP ... 46
8.1.2 Ciclo UEUC ... 48
8.1.3 Ciclo HIGHWAY ... 50
8.2 Metodologia di calcolo dei costi energetici ... 51
8.3 Costo energetico totale ed annuale ... 53
8.3.1 Ciclo guida WLTC a singola percorrenza ... 55
8.3.2 Ciclo guida UEUC ... 60
8.3.3 Ciclo guida HIGHWAY ... 65
9. Confronto del costo totale annuale tra le architetture PHEV ... 68
9.1 Confronto su WLTC a singola percorrenza ... 69
9.2 Confronto su UEUC ... 74
9.3 Confronto su HIGHWAY ... 78
10. Break even point della ricarica elettrica su PHEV p4 ... 81
11. Confronto economico trai PHEVs ed i BEVs ... 83
11.1 Primo scenario di guida medio. ... 83
11.2 Secondo scenario di guida medio ... 85
11.3 Terzo scenario di guida medio ... 86
11.4 Quarto scenario di guida medio ... 87
11.5 Confronto tra i costi energetici annuali in caso di ricarica elettrica domestica ... 88

11.6 Confronto tra i costi energetici annuali in caso di ricarica elettrica parzialmente pubblica 94
12. Il costo della ricarica elettrica 101
13. Total cost of ownership dei PHEVs e BEVs 107
14. Stato dell'arte 111
15. Conclusioni 114
Indice tabelle 117
Indice figure 118
Bibliografia 122

Ringraziamenti

Al termine di questo percorso porgo un sentito ringraziamento ai professori Bruno Dalla Chiara ed Ezio Spessa, senza i quali la tesi qui presentata non sarebbe stata possibile. Li ringrazio, inoltre, per la loro disponibilità, competenza e per avermi guidato con puntualità durante tutta la costruzione di questo lavoro.

Ringrazio Marcello Marabete e l'Ing. Claudio Maino per avermi guidato nei passaggi iniziali della tesi e, successivamente, illustrato e reso disponibile il software di calcolo grazie al quale il corpo centrale della tesi è stato redatto.

Ringrazio Dalila per tutto l'amore che prova per me e che mi trasmette. Abbiamo condiviso questo percorso in ogni suo pezzo e senza di te non sarei la persona che sono oggi.

Un ringraziamento va, infine, a mio padre e mia madre che, anche se a distanza, sono sempre riusciti a supportarmi e a sostenermi durante questo percorso.

Glossario

PHEV: Plug-in hybrid electric vehicle.

BEV: Battery electric vehicle.

HEV: Hybrid electric vehicle,

$\boldsymbol{CO_2ttw}$**:** CO_2 tank to wheel.

PEV: Plug-in electric vehicle (è un modo per considerare insieme PHEV e BEV).

CICE: Conventional internal combustion engine.

NEDC: New european driving cycle.

LCA: Life cycle assessment.

S.o.C: State of charge.

ZLEV: Zero and Low Emission Vehicle.

OOL: Optimal operation line.

TCO: Total cost of ownership.

ABSTRACT

Con questo elaborato di tesi, basandosi sullo stato dell'arte, ci si pone l'obiettivo di osservare, in modo analitico, se l'adozione di veicoli con emissioni di gas serra a livello locale basse o nulle possa essere, non solo sostenibile, ma anche appetibile all'utente da un punto di vista principalmente economico. In particolare, la tipologia di autoveicolo scelto è l'ibrido plug-in: dopo averne illustrato le caratteristiche principali e fornito una stima riguardante il costo iniziale, viene realizzato un confronto tra le architetture più comuni. Tale comparazione è realizzata tramite il software HEVBox del Politecnico di Torino (area motori), con il quale le diverse motorizzazioni sono testate su cicli guida reali. Lo scopo di questo confronto è quello di comprendere se vi sia un'architettura preferibile in termini di costo d'esercizio annuale e, come tale, più appetibile all'acquirente. Inoltre, il confronto mostra come lo stato di carica della batteria giochi un ruolo economicamente fondamentale e possa orientare le abitudini di guida e di ricarica dell'utente, oltreché, nel caso di veicoli solo elettrici, nella sua gestione delle attività quotidiane. Infine, dopo aver ipotizzato quattro diversi scenari di guida annuali, viene proposto un confronto tra le citate architetture ibride plug-in ed alcune motorizzazioni elettriche, i cui dati di consumo sono ricavati sulla base delle informazioni rese note dai costruttori. I risultati della tesi mostrano come l'architettura PHEV p4 sia complessivamente preferibile alle altre, sia in termini di consumo sia di costo di esercizio; gli esiti evidenziano come, anche se paragonati ai veicoli puramente elettrici, gli ibridi plug-in possano comunque giocare il loro ruolo nel settore automotive odierno, dove l'attenzione alla riduzione delle emissioni locali di gas serra e di inquinanti non può prescindere né dalle emissioni globali, non trattate in questa tesi, né dalla gestione delle attività quotidiane nonché tranquillità di spostamento oltre che dalla spesa dell'utente.

1. Introduzione

Il tema della salvaguardia ambientale è diventato sempre più centrale nel dibattito pubblico e politico tanto che, negli ultimi anni, gli sforzi fatti per ridurre l'inquinamento di origine antropica sono diventati sempre più significativi. Per affrontare la questione ambientale, l'Unione Europea, in accordo con gli stati membri, ha varato, nel 2019, il *"Green Deal Europeo [1]* ". Esso, riprendendo *l'accordo di Parigi*, certifica l'impegno della Commissione nell'affrontare i problemi relativi all'ambiente ed al clima, istituendo una tabella di marcia che, secondo le previsioni, porterà la Comunità europea ad essere, nel 2050, un'economia moderna a zero impatto climatico. In particolare, l'attenzione è rivolta all'eliminazione delle emissioni di CO_2 che, essendo strettamente collegate all'effetto serra, pongono un serio problema climatico.

Per attuare un programma così ambizioso è necessario intervenire drasticamente anche sul mondo dei trasporti il quale, come ormai noto alla comunità scientifica, è responsabile di circa il 25% delle emissioni di gas serra nel territorio europeo. Inoltre, la decarbonizzazione del settore porterebbe, come conseguenza diretta, ad una drastica riduzione delle emissioni di inquinati primari *(CO, HC, PM e* NO_x) nocivi alla salute dell'uomo. A tal proposito, nel documento *"Air quality in Europe – 2015 [2]"* redatto dall'*European Environmental Agency (EEA)* sono state attribuite, in Italia nel 2012, agli ossidi di azoto ed al particolato (in particolare il PM2,5), rispettivamente 21600 e 59500 morti che, sebbene non possano essere semplicemente addizionate tra loro, rappresentano un numero ingente di decessi.

Se in un primo momento lo scoppio della pandemia Covid-19 aveva cristallizzato lo sviluppo e l'attuazione di questi programmi, già dalla seconda metà del 2020 e principalmente nel corso del 2021, anche grazie agli ingenti fondi economici stanziati dagli stati membri dell'UE, vi è stato un nuovo exploit riguardo il tema della salvaguardia ambientale. Il pacchetto di proposte *"Fit for 55: Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality [3]",* pubblicato a luglio 2021, il cui nome allude alla riduzione netta del 55% di emissioni di anidride carbonica entro il 2030, rivede ed integra il *Green Deal* mirando all'obiettivo di rendere a zero emissioni tutte le autovetture nuove immatricolate dal 2035.

Per supportare quelli che si prospettano come enormi cambiamenti nella struttura economica mondiale e nella vita dei cittadini, gli stati membri dell'Unione hanno previsto importanti sovvenzionamenti per promuovere questi cambiamenti tecnologici. In particolare, l'Italia ha stanziato, in primis nella *"Legge di bilancio dicembre 2018 [4]"* e successivamente nel *"decreto bilancio 2021 [5]"* ingenti incentivi per la sostituzione del parco circolante attuale con veicoli a minori emissioni di inquinanti. Nonostante ciò, non mancano delle perplessità, anche trai legislatori, in merito alle modalità con cui è proposta oggigiorno la transizione ecologica. A tal proposito l'attuale Ministro della transizione ecologica, Roberto Cingolani, ha espresso delle preoccupazioni in tal senso. Infatti, se da un lato la salvaguardia ambientale è una tematica da mettere in primo piano nella vita politica e pubblica di un paese, non possono essere ignorati i problemi economici e sociali che nel breve termine, con la concretizzazione di questo processo di transizione, ricadrebbero su molte persone. In un mondo ancora estremamente dipendente dalle emissioni di CO_2 e diversificato in termini di ricchezza pro-capite, è infatti improbabile che una radicale riconversione energetica possa essere attuata senza costi sociali. È quindi necessario prendere atto della complessità del problema e cercare la strada più efficiente per la sua risoluzione, che al contempo ne massimizzi il risultato ma che non ne trascuri la componente sociale ed economica.

In questo lavoro di tesi, basandosi sul background legislativo e culturale odierno, si cerca di osservare in modo analitico se l'adozione di veicoli a basse emissioni di inquinanti (in particolare gli ibridi plug-in) possa essere, non solo sostenibile da un punto di vista ambientale, ma anche appetibile economicamente per l'utente. Come tale, questa tesi, si pone in diretta continuità con il lavoro *"Studio sul raggiungimento degli obiettivi specifici sulle emissioni di CO_2 per un autoveicolo ibrido plug-in con simulazione di cigli di guida reali, (2021) [6]"* che aveva indagato i vantaggi in termini di emissioni di inquinanti di una motorizzazione ibrida plug-in con architettura p2 rispetto ad una soluzione di tipo convenzionale. Qui, invece, l'obiettivo è quello di comprendere se vi sia un'architettura ibrida preferibile alle altre in termini di costi operativi e se, ipotizzando diversi scenari di guida, tali motorizzazioni possano competere (sempre in termini economici) con i veicoli puramente elettrici.

2. I veicoli a basse emissioni di inquinanti

Quando si parla di veicoli a basse emissioni di inquinanti si fa riferimento, principalmente, alle auto elettriche e alle auto ibride. Tuttavia, tra queste motorizzazioni vi sono marcate differenze in termini di gestione dell'energia a bordo, di funzionamento del veicolo stesso e nelle emissioni derivanti dal veicolo. Evidenziare queste differenze è necessario sia per comprendere al meglio le caratteristiche positive e negative di ciascuna motorizzazione, sia per meglio orientare l'attenzione dell'acquirente verso un mezzo di trasporto che risponda maggiormente alle proprie esigenze. Infatti, se da un lato all'utente viene richiesto di ridurre la propria carbon footprint, questo obiettivo non può essere perseguito prescindendo dai comfort che le vetture convenzionali consentono. Per tale motivo la comprensione delle limitazioni di questi veicoli è di essenziale importanza.

I BEVs sono veicoli puramente elettrici in cui la batteria è l'unica fonte di energia a bordo. Essa è ricaricabile dall'esterno mediante una presa di corrente ed è connessa al motore elettrico mediante un inverter. Tale motore è collegato direttamente alle ruote mediante una trasmissione che può essere monomarcia o bimarcia. I benefici di una motorizzazione esclusivamente elettrica sono molti: l'assenza di emissioni di gas serra tank to wheel, l'efficienza di trasformazione dell'energia in moto è sensibilmente più alta rispetto ad un veicolo convenzionale, una componentistica inferiore da cui consegue, mediamente, un minor costo di manutenzione negli anni, la possibilità di caricare la batteria durante il moto (frenata rigenerativa), una bassa rumorosità. Tuttavia, a fronte di questi vantaggi, le limitazioni derivanti da questo tipo di motorizzazione sono la ragione per cui i BEVs non rappresentano ancora la scelta primaria di molti acquirenti. I contro di un veicolo esclusivamente elettrico sono, infatti, la ridotta autonomia di guida e i lunghi tempi per ricaricare la batteria. A ciò è necessario aggiungere, visto l'attuale stato dell'arte, un prezzo di listino più alto rispetto ad un veicolo convenzionale equivalente. La nomenclatura dei BEVs è oggi contraddistinta da un numero (es. BEV300), che si riferisce ai chilometri di autonomia certificati su ciclo guida (tipicamente il ciclo NEDC) dal costruttore. Per tale ragione, spesso, nella realtà di guida, l'autonomia di un BEV è sensibilmente inferiore a quella dichiarata. In figura 1 si riporta lo schema funzionale di un veicolo puramente elettrico.

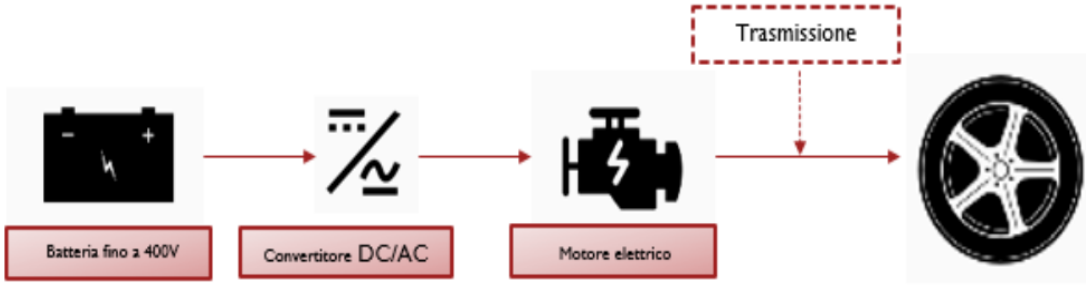


Figura 1: schema funzionale di un veicolo elettrico

Un veicolo HEV è un veicolo che dispone di un motore endotermico principale (tipicamente ad accensione comandata) e di uno o più motori elettrici collegati direttamente o indirettamente alle ruote. Gli HEVs si possono distinguere in:

– Ibrido Serie: In questo tipo di ibrido vi è un collegamento meccanico tra il motore elettrico e le ruote ed un collegamento elettrico tra il motore endotermico e quello elettrico. Il motore convenzionale non è quindi connesso direttamente alle ruote e, come tale, funziona come un gruppo di generazione dell'energia elettrica. L'applicazione naturale di questa tipologia di veicolo ibrido è il *range extender* in cui, quando la batteria è scarica, il motore termico si attiva e fornisce al veicolo la ricarica elettrica senza la necessità di connettersi alla rete. Tuttavia, questa architettura non è esente da problemi, in quanto da un lato l'efficienza di conversione dell'energia tra motore termico ed elettrico è molto bassa e dall'altro, in caso in cui il veicolo venga usato per una mission diversa da quella prevista in sede di progetto, c'è il rischio che, se la batteria si dovesse scaricare, il motore termico non riesca ad effettuare la ricarica in movimento e occorra accettare di fermarsi per dare il tempo al sistema di ricaricarsi.

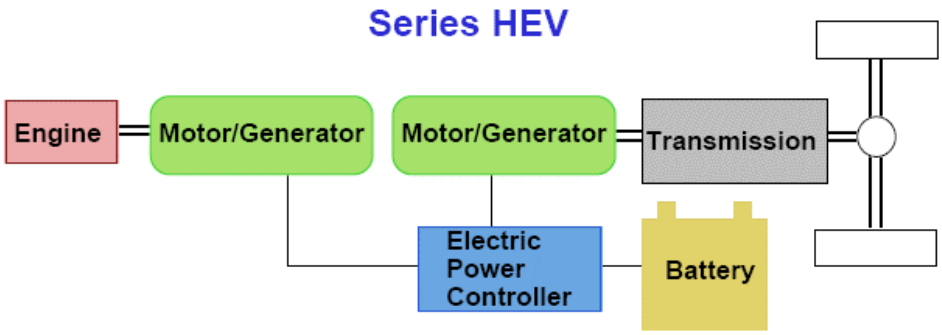


Figura 2: schema funzionale di un ibrido serie

– Ibrido Parallelo: In questa architettura ibrida le ruote sono collegate meccanicamente sia alla macchina elettrica sia al motore endotermico. In questo caso, quindi, entrambi i motori possono trasferire potenza alle ruote. La maggior parte dei veicoli ibridi sono appartenenti a questa tipologia. In questi HEVs diventa di fondamentale importanza la posizione del motore elettrico. Grazie al doppio collegamento meccanico questo ibrido consente il funzionamento del veicolo in: puro-termico, power-split, puro-elettrico e battery-charging; a differenza dell'ibrido serie dove il funzionamento in puro-termico è precluso.

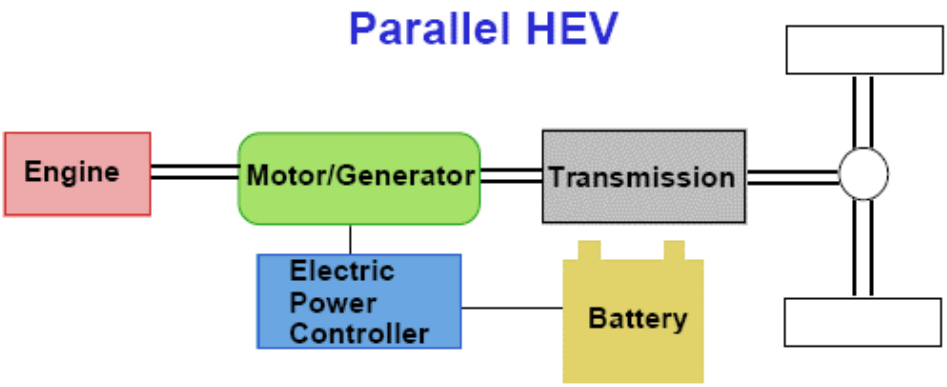


Figura 3: schema funzionale di un ibrido parallelo

– Ibrido Complesso: a differenza degli ibridi serie e parallelo (anche definiti come ibridi semplici) dove è presente un solo motore elettrico, in questo caso il veicolo dispone di un motore convenzionale e due o più motori elettrici. Tipicamente, invece, la batteria è unica e assiste tutti i motori elettrici.

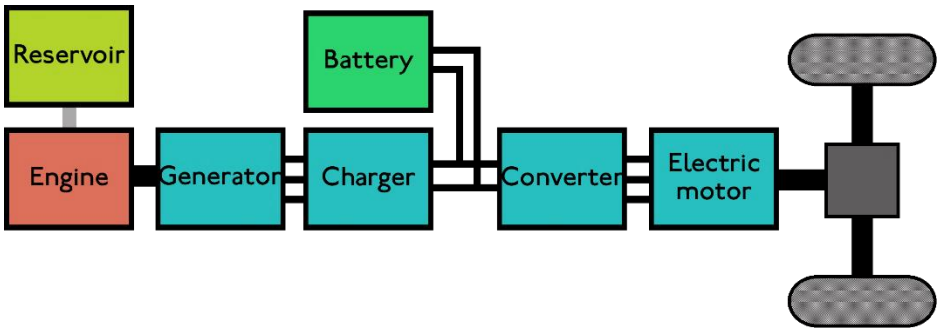


Figura 4: schema funzionale di un ibrido complesso

Un'ulteriore classificazione per i veicoli ibridi si basa sull'intensità delle funzionalità ibride consentite al veicolo. Gli HEVs, per tale motivo, sono distinguibili in:

- micro-hybrid: utilizza un impianto di circa 12 - 42 *[V]* o inferiore, delle batterie a capacità ridotta e un motore elettrico di potenza non superiore a 2,5 *[kW]*. A differenza di un veicolo convenzionale consente di effettuare lo start and stop e di assistere il motore termico in alcune funzionalità per ridurre di qualche punto percentuale le emissioni di CO_2ttw.
- mild-hybrid: hanno un impianto elettrico di circa 48 *[V]* ed un motore elettrico di potenza non superiore a 10 *[kW]* che consentono, oltre alle funzionalità già previste per il micro-hybrid, l'integrazione della frenata rigenerativa con la quale, parte dell'energia dissipata dalla frenata, viene recuperata ed utilizzata per ricaricare la batteria.
- full-hybrid: Quest'ultimo, che dispone di un motore elettrico di potenza compresa tipicamente tra 20 e 100 *[kW]*, consente, insieme a tutta una serie di funzioni di supporto al motore termico, una guida puramente elettrica, seppur solo per qualche chilometro e tipicamente a velocità ridotta e costante. Tra le funzioni di supporto si ricordano quelle viste precedentemente: lo start and stop, frenata rigenerativa, e-boost, l'electric lunch.

Infine, un veicolo PHEV è un HEV full hybrid che dispone in più di un sistema di ricarica che consente di effettuare la ricarica elettrica anche dall'esterno. Questa tipologia di veicoli è però realizzata con una batteria più grande rispetto ai normali full-hybrids, che consenta un'autonomia puramente elettrica di circa 50-70 *[km],* per poi continuare a funzionare, con la batteria al minimo e grazie al motore endotermico, come un full hybrid tradizionale. Un veicolo PHEV se da un lato non consente di eliminare le emissioni di

CO_2ttw, a causa della presenza del motore convenzionale, riesce, dall'altro lato, a sopperire alle due limitazioni principali del BEV. Infatti, avere un motore endotermico a bordo consente di aumentare notevolmente l'autonomia di guida e questo fa sì che il veicolo non richieda una ricarica elettrica immediata per poter continuare a funzionare. Visti i tempi lunghi per la ricarica elettrica, l'utente può, quindi, attendere un momento in cui non ha bisogno del veicolo per ricaricarlo. Inoltre, non essendo l'unica fonte energetica a bordo, la batteria di un ibrido plug-in è sensibilmente più piccola di quella di un BEV e, dunque, i propri tempi di ricarica elettrica sono inferiori. Parimenti a quest'ultimo, il prezzo di listino di un veicolo ibrido plug-in è sensibilmente maggiore rispetto ad un veicolo convenzionale.

3. Il mercato attuale dei veicoli BEV e PHEV

In Italia, negli ultimi due anni, si è assistito ad una crescita netta nell'acquisto di autovetture BEVs e PHEVs. Le analisi di mercato condotte da "*Motus-e [7]*" (riassunte nel grafico in figura 5) ritraggono questo andamento. Tuttavia, tali numeri, se paragonati all'attuale parco circolante italiano rappresentano una percentuale di circa 0,1-0,2% per i BEVs e di circa l'1% per quanto riguarda le motorizzazioni ibride benzina (di cui i PHEVs sono parte).

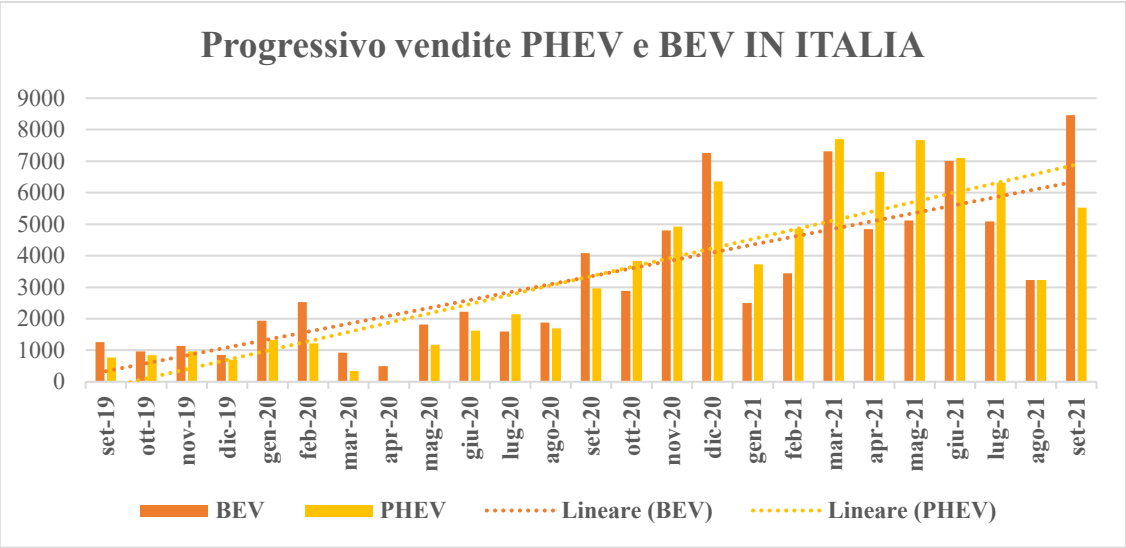


Figura 5: Progressivo vendite BEV e PHEV in Italia (fonte: analisi di mercato Motus-e)

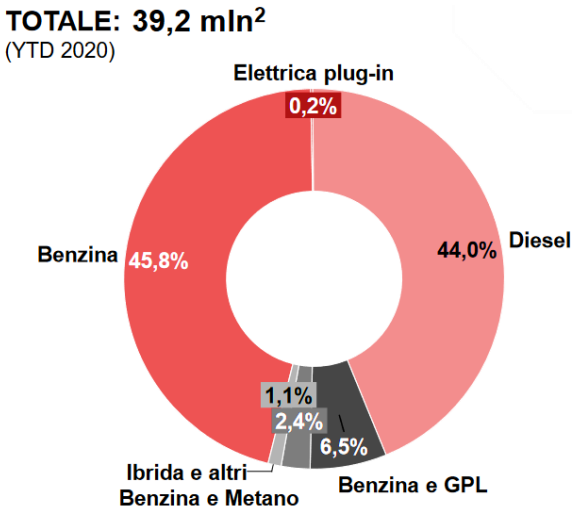


Figura 6: percentuale tipologia di veicolo rispetto al parco circolante (fonte: analisi di mercato Motus-e)

I numeri italiani, se paragonati con quelli di altri paesi europei sono sensibilmente più bassi; tuttavia, anche in paesi dove la percentuale di auto elettriche è maggiore (per esempio la Norvegia), esse numericamente si attestano tra il 10-15% del parco circolante. Il motivo per cui non è avvenuto un boom di vendite di auto BEVs e PHEVs va ricercato tra molteplici fattori. Per quanto concerne gli ibridi plug-in, l'ostacolo maggiore è sicuramente il prezzo di listino in quanto, disporre di più di una fonte energetica a bordo, è molto oneroso. Inoltre, un'architettura di questo tipo di solito è integrata su auto di grossa taglia che non rispondono alle esigenze di tutti gli utenti.

Il lieve successo attuale dei BEVs va invece ricercato, invece, sia nelle problematiche relative alla ridotta autonomia e alle lunghe tempistiche per la ricarica, sia nel prezzo di listino maggiore rispetto ai veicoli convenzionali equivalenti.

Per entrambe queste tipologie di veicolo, il costo di produzione delle batterie è di forte impatto sul prezzo di acquisto e, come tale può rappresentare una barriera all'ingresso per molti utenti. Studi come: "*Large-scale automotive battery cell manufacturing: Analyzing strategic and operational effects on manufacturing costs; (2021) [8]"* mostrano come, in questi anni sia ancora in corso un procedimento di apprendimento e di ottimizzazione del modo in cui produrre, su larga scala, le batterie di un veicolo elettrico. In virtù di questo processo di miglioramento, la pubblicazione: "*On Modeling the Cost of Ownership of Plug-In Vehicles; (2021) [9]"* prospetta un andamento della stima del costo di riferimento delle batterie, per veicoli BEVs e PHEVs, al 2030. Si riporta tale andamento in figura 7.

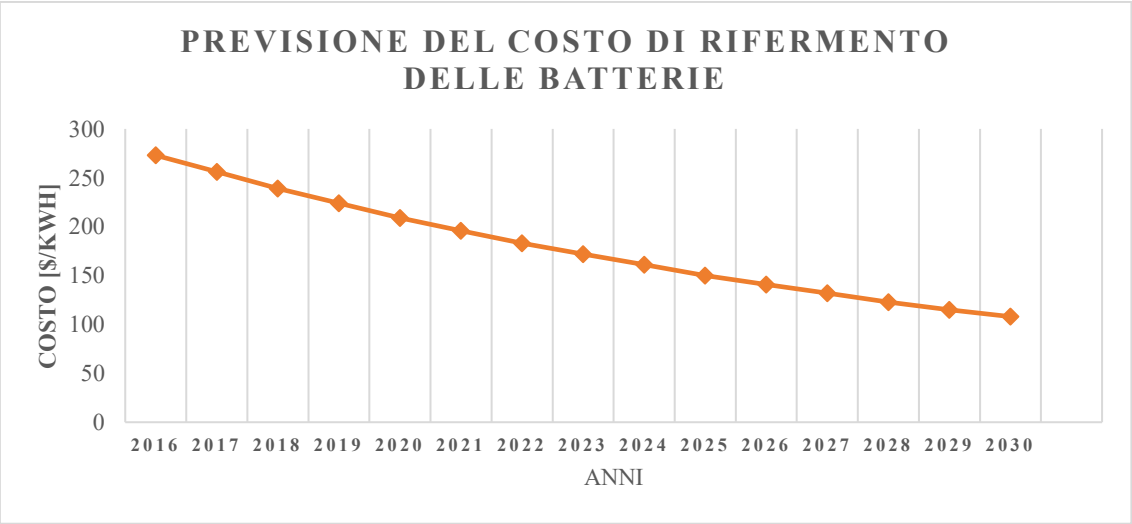


Figura 7: Previsione del costo di riferimento delle batterie al 2030

Per mettere in secondo piano queste problematiche ed invogliare gli acquirenti a scegliere un veicolo a basse emissioni di inquinanti, la maggior parte dei paesi, sebbene con le dovute differenze, ha provveduto ad instaurare dei piani di incentivo all'acquisto. Attualmente, in Italia, gli incentivi previsti sono riportati in tabella 1:

Tabella 1: incentivi totali disponibili dal governo italiano tramite il decreto bilancio 2021

CONTRIBUTI TOTALI		
Emissioni CO2 ***[g/km]***	**Senza rottamazione** ***[Eur]***	**Con rottamazione** ***[Eur]***
Da 0 a 20	6000	10000
Da 21 a 60	3500	6500
Da 61 a 135	0	3500

È lecito chiedersi se incentivi meramente economici possano essere, da soli, uno strumento sufficiente per far prosperare il mercato di auto a basse emissioni. Diversi studi, infatti, concorrono nell'osservare non tanto l'importanza degli incentivi economici in senso stretto, quanto l'importanza di un "policy-mix", ossia un insieme di politiche volte alla promozione di queste motorizzazioni. Lo studio *"Do policy mix charateristics matter for electric vehicle adoptin? A survey-based exploration;(agosto 2020) [10]"* indaga proprio questo argomento e dimostra come, solo un insieme di politiche tra loro coerenti, consistenti, credibili e comprensive di tutto ciò che è indirettamente connesso alla mobilità sostenibile, condizioni positivamente l'acquisto di queste tipologie di auto. Inoltre, lo scopo delle politiche di incentivo non deve essere solo quello di finanziare l'acquirente bensì anche quello di comunicargli i benefici derivanti dall'acquisto di queste vetture. Il report, inoltre, non trascura l'importanza di una serie di aspetti psicologici individuali che possono positivamente influenzare gli utenti in questo tipo di acquisto.

Un altro articolo, dal titolo: *"Understanding the impact of reocurring and non-financial incentives on plug-in electric vehicle adoption – a review 2019 [11]"* si concentra proprio sull'impatto che possono avere gli incentivi non strettamente finanziari come ad esempio: corsie preferenziali per i possessori di auto PEVs, infrastrutture pubbliche di ricarica, bonus per i parcheggi pubblici, riduzione delle tasse annuali di circolazione e riduzione del pedaggio autostradale. Il report conclude spiegando che, sebbene con le dovute

differenze regionali e nazionali, questo tipo di interventi influiscano positivamente sulla sostituzione del parco circolante con uno a minori emissioni di gas serra.

Tra questi incentivi non strettamente finanziari, in Italia, particolari sforzi sono rivolti al potenziamento dell'infrastruttura di ricarica elettrica pubblica o pubblica ad uso privato. Il report *"Le infrastrutture di ricarica pubbliche in Italia; Motus-e (2020) [12]"* mostra un andamento, praticamente linearmente crescente, dei punti di ricarica di questo genere sul territorio nazionale, sebbene rimangano disomogeneità tra Nord e Sud (come riportato in figura 8 e 9).

In particolare, i punti di ricarica pubblici o pubblici ad uso privato possono essere di potenza standard o elevata. Nel primo caso si tratta di una ricarica lenta (fino a 7 *[kW]*) o accelerata (dai 7 ai 20 *[kW])*, nel secondo caso, invece, veloce (dai 22 ai 50 *[kW]*) o ultraveloce (superiore a 50 *[kW]*).

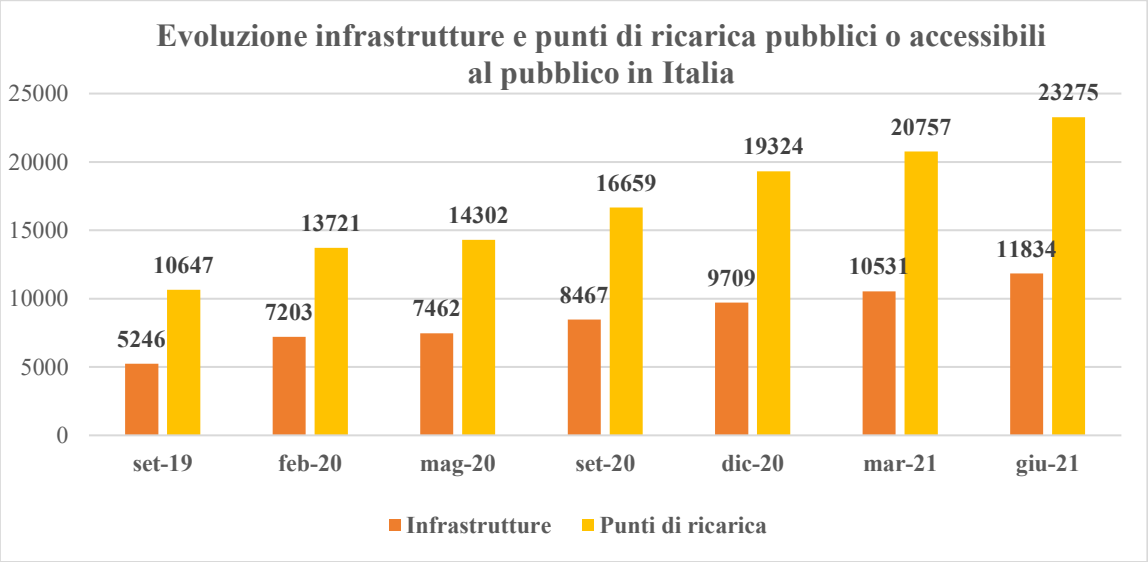


Figura 8: Evoluzione infrastruttura e punti di ricarica pubblici o accessibili al pubblico in Italia

REGIONE	TOTALE PUNTI DI RICARICA	TOTALE INFRASTRUTTURE	TOTALE LOCATION
ABRUZZO	528	271	214
BASILICATA	172	91	83
CALABRIA	457	231	200
CAMPANIA	680	361	248
EMILIA-ROMAGNA	2.248	1.162	975
FRIULI-VENEZIA GIULIA	509	257	205
LAZIO	2.376	1.229	892
LIGURIA	679	349	278
LOMBARDIA	4.130	1.951	1.590
MARCHE	601	304	259
MOLISE	116	58	48
PIEMONTE	2.386	1.203	1.009
PUGLIA	922	475	417
SARDEGNA	705	356	268
SICILIA	902	459	376
TOSCANA	1.915	1.000	749
TRENTINO-ALTO ADIGE	979	536	486
UMBRIA	541	276	246
VALLE D'AOSTA	373	192	164
VENETO	2.056	1.075	746

Figura 9: Distribuzione infrastruttura e punti di ricarica pubblici o accessibili al pubblico in Italia

Occorre citare, però, altri studi, tra cui: *"Evaluating the effectiveness of electric vehicle subsidies in Canada; (2019) [13]"* che mostrano come i sussidi economici, sebbene quasi indispensabili per rendere le motorizzazioni elettriche economicamente competitive rispetto ai CICEs, potrebbero non essere lo strumento più efficace ed efficiente se l'obiettivo è quello di ridurre le emissioni dei gas serra. Infatti, il rapporto costo-beneficio nell'intraprendere misure di incentivo rivolte al rinnovo del parco veicolare è spesso più sconveniente rispetto ad altre misure necessarie a contrastare le emissioni di gas serra. Inoltre, il costo per tonnellata di CO_2 emessa varia molto tra le varie regioni dipendentemente dal fatto che l'energia elettrica provenga o no da fonti rinnovabili.

Infine, studi come: "*Understanding discontinuance among California'selectric vehicle owners; (2021) [14]* "mostrano come vi sia, in California, tra il 2012 ed il 2018, rispettivamente il 18,1% ed il 20,1% di utenti che, dopo essere passati ad una motorizzazione BEV o PHEV sono ritornati ad un veicolo convenzionale. In particolare, la discontinuità nell'acquisto di questo tipo di motorizzazioni è correlata principalmente alla difficoltà di ricarica piuttosto che all'autonomia di guida. Inoltre, è stato osservato come mediamente chi possiede più di un veicolo sia meno incline a rinunciare al veicolo BEV o PHEV, mentre chi dispone di un solo veicolo si affiderà più probabilmente ad una motorizzazione convenzionale.

4. BEV o PHEV?

Sulla base dello scenario attuale e vista la complessità del problema in esame, lo scopo di questo lavoro di tesi è comprendere se i veicoli a ridotte emissioni di CO_2 (in particolare i PHEVs) siano appetibili economicamente per l'utente. L'attenzione è rivolta principalmente all'ibrido plug-in perché, questo tipo di motorizzazione, pur con le sue limitazioni, consente di effettuare una transizione più graduale dai veicoli convenzionali a quelli *green* attualmente proposti sul mercato.

Come precedentemente accennato, infatti, un veicolo BEV se da un lato non emette CO_2ttw, dall'altro presenta una minor autonomia e dei lunghi tempi di ricarica. A tal proposito, il lavoro di tesi "*Il passaggio a soluzioni plug-in per autoveicoli in Piemonte: gli impatti sul sistema elettrico e sull'ambiente che ne derivano. (2021) [15]"* mostra chiaramente come, considerati i picchi di carico orari, nelle ore notturne (0:00 – 7:00) sia possibile ricaricare un veicolo plug-in a 2,3 *[kW]* avendo a disposizione un normale contratto di fornitura elettrica di 3 *[kW]* (circa il 90% degli utenti), oppure a 3,7 *[kW]* qualora si adegui il contratto elettrico a 4,5 *[kW]*. Considerando ciò, si osserva, dalle tabelle riportate (tabella 2 e 3), come la maggior parte dei veicoli BEVs riescano a ricaricare la batteria in modo piuttosto insoddisfacente a differenza dei PHEVs che, avendo una batteria sensibilmente più piccola, riescano a ricaricarla completamente.

Tabella 2: Risultati per la ricarica notturna domestica a 2,3 kW in relazione all'energia totale contenuta nella batteria e all'energia necessaria per l'uso giornaliero del veicolo. Da [15]

ARCHITETTURE	**Ricarica domestica a 2,3 *kW* (0:00-7:00)**	
	Energia ottenuta dalla ricarica domestica. *[kWh]*	**Percentuale ricaricato rispetto al totale *[%]***
PHEV40	8,8	100%
PHEV60	12	100%
BEV150	16,1	91,50%
BEV300	16,1	39,30%
BEV400	16,1	26%
BEV600	16,1	16,10%

Tabella 3: Risultati per la ricarica notturna domestica a 3,7 kW in relazione all'energia totale contenuta nella batteria e all'energia necessaria per l'uso giornaliero del veicolo. Da [15]

ARCHITETTURE	**Ricarica domestica a 3,7 *kW* (0:00-7:00)**	
	Energia ottenuta dalla ricarica domestica. *[kWh]*	**Percentuale ricaricato rispetto al totale *[%]***
PHEV40	8,8	100%
PHEV60	12	100%
BEV150	16,1	100,00%
BEV300	16,1	61,70%
BEV400	16,1	35,8%
BEV600	16,1	25,90%

La ridotta autonomia dei BEV è il limite sicuramente più pesante cui l'utente si trova a far fronte. La ragione per cui i veicoli puramente elettrici non consentono una percorrenza paragonabile a quella dei veicoli convenzionali o ibridi è dovuta alla ridotta densità energetica delle batterie che oggi vengono utilizzate nel settore automotive. L'attuale stato dell'arte prevede batterie a ioni di litio e talvolta a polimeri di litio, la cui densità energetica si attesta intorno ai 150 – 200 *[Wh/kg]*. Con tali valori, per raggiungere un'autonomia paragonabile a quella di un veicolo convenzionale (la cui fonte energetica è il combustibile liquido che ha un'altissima densità energetica), occorrerebbe un pacco batterie estremamente pesante. A ciò si deve aggiungere il peso del *battery managment system* che non è affatto trascurabile. Quindi, vista la non possibilità di avere un sistema energetico a bordo di una o due tonnellate, si è obbligati ad accettare un'autonomia ridotta.

Sulla base di quanto riportato, se da un alto ci si aspetta, nei prossimi anni, un miglioramento tecnologico delle batterie che porti ad un innalzamento della densità energetica, dall'altro è lecito aspettarsi che quest'ultima non possa raddoppiare o triplicare nel breve periodo e che quindi l'autonomia di un BEV rimanga sempre strettamente minore rispetto a quella di un veicolo tradizionale. Inoltre, questo miglioramento tecnologico non deve portare ad un sensibile aumento del prezzo delle batterie, che avrebbe il solo risultato di rendere i BEVs poco appetibili economicamente. In figura 10 e 11 si riportano rispettivamente le tipologie di batterie attualmente disponibili per il settore automotive, in funzione della densità energetica *[Wh/kg]* e

[Wh/l], e la relazione che sussiste tra peso del *power-train* e sistema energetico a bordo, rispetto all'autonomia su ciclo NEDC.

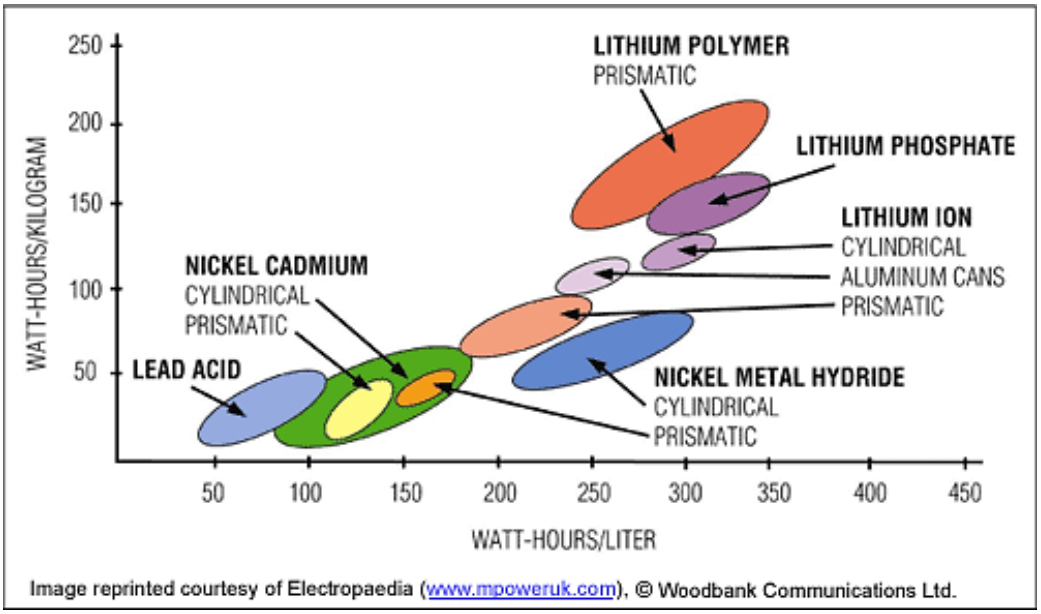


Figura 10: Tecnologie disponibili per le batterie nel settore automotive

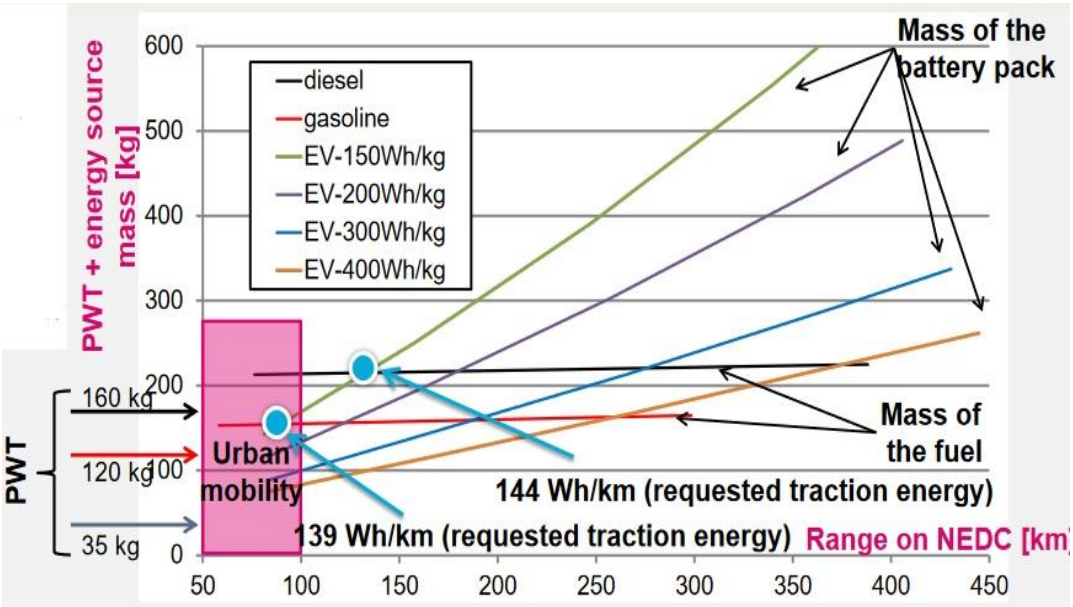


Figura 11: Peso del power-train e della fonte energetica rispetto al range su ciclo NEDC

Un ibrido plug-in, invece, consente di superare le limitazioni dei BEVs seppur al prezzo di una quota di emissioni di anidride carbonica e di inquinanti primari dovuti alla combustione. Inoltre, l'entità di queste emissioni varia fortemente con la modalità di utilizzo del PHEV e dalle abitudini di guida e di ricarica dell'utente.

A tal proposito, lo studio *"REAL-WORLD USAGE OF PLUG-IN HYBRID ELECTRIC VEHICLES FUEL CONSUMPTION, ELECTRIC DRIVING, AND CO2 EMISSIONS (2020) [16]"* mostra come vi sia, per i PHEVs, da un lato una differenza di circa il 50% tra l'*utility factor (UF)* (quantità di chilometri percorsi dal veicolo in puro elettrico) calcolato su ciclo guida NEDC e quello reale su strada e, dall'altro, come anche la *fuel consumption* reale sia più alta di quella testata su ciclo NEDC di circa due/tre volte. Tale differenza, come è facilmente osservabile rispettivamente in figura 13 e 12, non è equamente distribuita nei paesi presi in considerazione come campione. Infatti, quelli in cui lo scostamento è minore sono i paesi in cui i PHEVs disponibiili sul mercato hanno un *electric range* mediamente maggiore e dove la ricarica elettrica è per diverse ragioni più incentivata, o attraverso un piano di disincentivo del combustibile tradizionale oppure poiché mediamente la possibilità di effettuare una ricarica privata è maggiore.

Inoltre, è evidente, una differenza tra veicoli ibridi plug-in ad uso privato e ad uso aziendale. In particolare, questi ultimi presentano un UF mediamente più basso poiché, talvolta, sono offerti alle compagnie dei bonus per la ricarica del combustibile tradizionale e ciò riduce ancora la frequenza della ricarica elettrica.

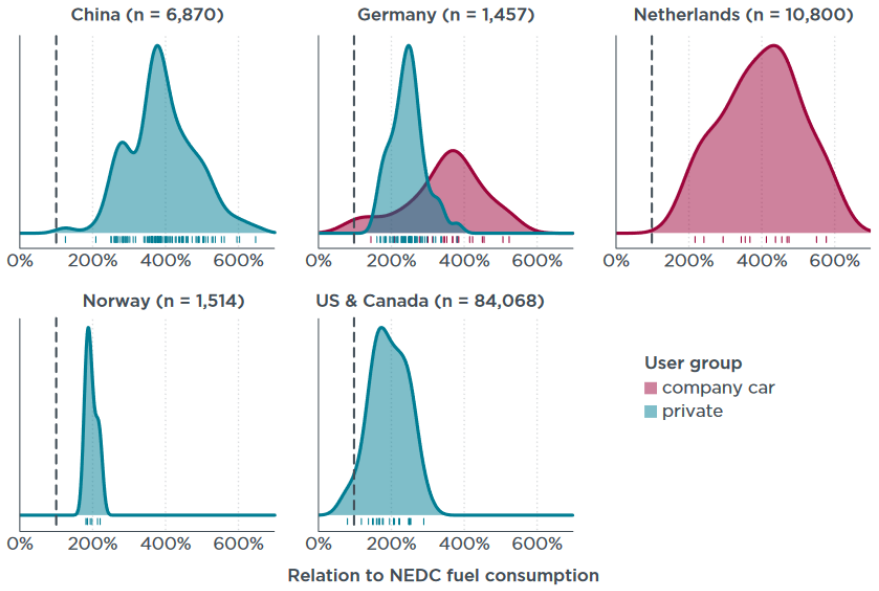


Figura 12: Scostamento fuel consumption reale PHEV rispetto a quello calcolato su NEDC in vari paesi

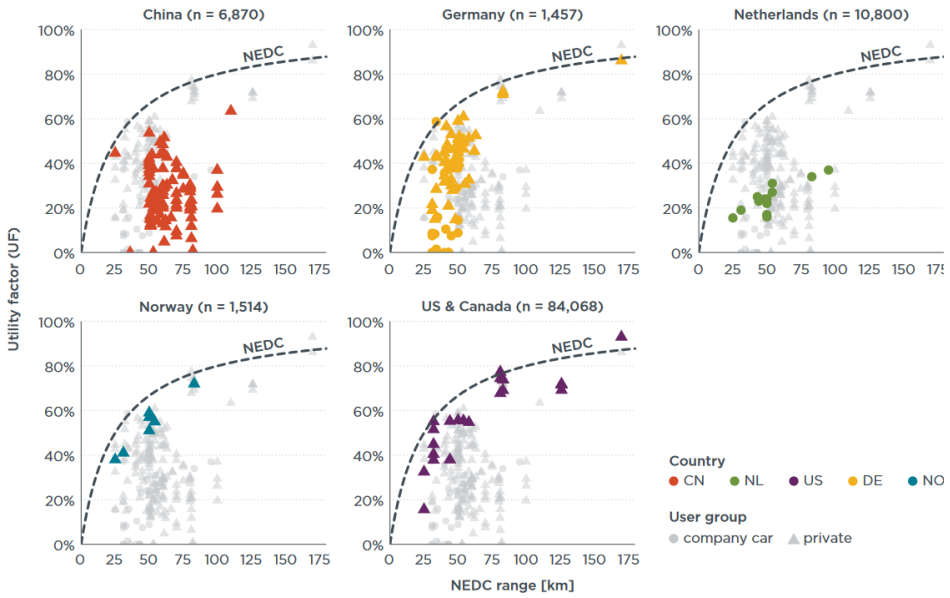


Figura 13: Scostamento UF reale PHEV rispetto a quello calcolato su NEDC in vari paesi

Le emissioni di CO_2ttw derivanti dai PHEVs variano sensibilmente in funzione della modalità di guida. In particolare, lo studio *"Plug-in hybrids: Is Europe heading for a new dieselgate? (2020) [17]"* mostra come le emissioni di anidride carbonica raggiungano, come ampiamente prevedibile, i valori più alti nella modalità *battery-charging.* Questo è dovuto al fatto che in questa modalità il motore termico si comporta come un *range-extender* e l'energia per arrivare alla batteria deve subire una doppia trasformazione (termica-meccanica, meccanica-elettrica) con un'efficienza complessiva piuttosto bassa. Tali differenze sono rese evidenti in figura 14.

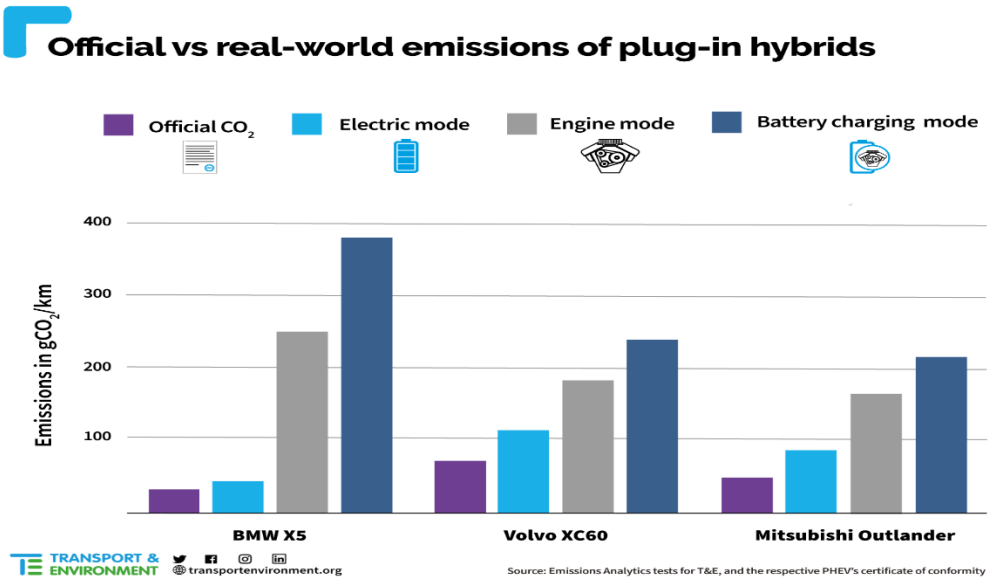


Figura 14: Official vs real-world emission of plug-in hybrids in base alla modalità di funzionamento

La quota di emissioni di CO_2ttw attribuibili ad un PHEV è fortemente influenzata dai chilometri annualmente e quotidianamente percorsi. Sempre [16], in figura 16, mostra la quantità di chilometri annualmente percorribili in funzione dell'*electric range* certificato. Si può osservare come il range puro elettrico che la maggior parte dei PHEV riesce a percorrere quotidianamente, sia compreso tra i 30 – 60 *[km]*, da cui ne consegue una percorrenza annuale solo elettrica di circa 5000 - 10000 *[km]*. Sebbene ciò possa sembrare una forte limitazione, la percorrenza quotidiana media in Italia, come attentamente esaminato nell'articolo: "*Perspectives on Electrification for the Automotive Sector: A Critical Review of Average Daily Distances by Light-Duty Vehicles, Required Range, and Economic Outcomes; (2019) [18]",* risulta essere compresa tra i 30 ed i 40 *[km]*. Questo è consistente anche con quanto trovato in U.K. ([18]) dove il 90% dei tragitti percorsi in

auto è sotto i 30 *[km]*. Inoltre, sempre in figura 15, è mostrato come la frequenza di viaggi brevi in contesti urbani sia molto più alta rispetto a quella dei viaggi più lunghi.

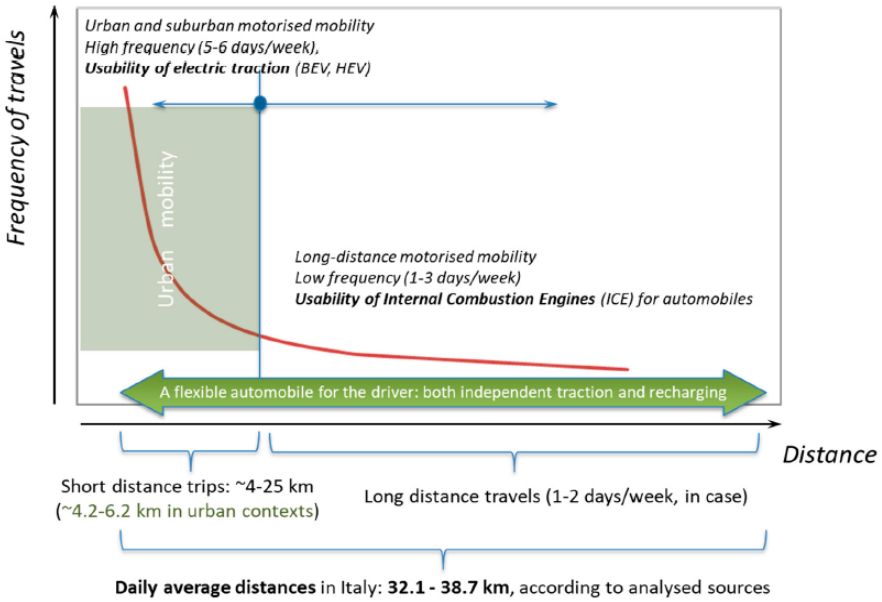


Figura 15: daily average distances in Italy

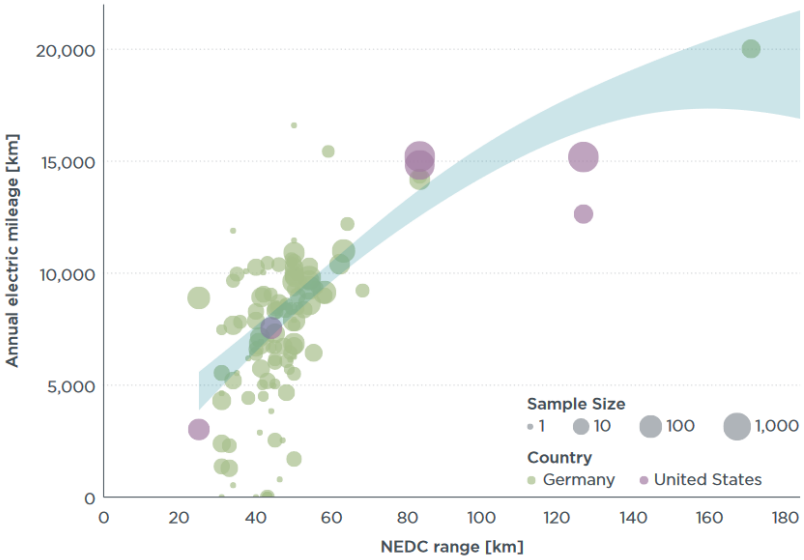


Figura 16: chilometri annuali percorribili in solo elettrico per le varie tipologie di PHEV

Infine, i PHEVs, a differenza delle auto solo elettriche, emettono inquinanti primari a causa della presenza del motore termico. L'adozione del PHEV non può quindi prescindere quindi dal costante miglioramento tecnologico dei sistemi di post-trattamento per migliorare il più possibile la qualità dell'aria.

Da quanto scritto e dai vai articoli riportati è evidente come vi sia un problema di trade-off tra i BEVs ed i PHEVs, in quanto a fronte di un prezzo di listino più alto rispetto ai veicoli convenzionali, le due motorizzazioni differiscono sensibilmente nei pregi e nei difetti. Infatti, i PHEVs garantiscono, a fronte di un'altissima autonomia di guida, delle emissioni di inquinanti e gas serra fortemente dipendenti dalle modalità di utilizzo del veicolo stesso e dal modo in cui l'utente gestisce la propria quotidiana mobilità. Viceversa, i BEVs se da un lato non permettono una lunga autonomia di guida ed incidono pesantemente, in virtù dei lunghi tempi di ricarica, sulle abitudini dell'utente, durante il loro funzionamento non emettono gas serra ed emettono ridottissime quantità di inquinanti primari.

Tuttavia, concludere affermando che i veicoli puramente elettrici non emettano CO_2 sarebbe un errore. Difatti, le analisi *tank-to-wheel,* su cui sono calibrate le normative per le emissioni di gas serra e di inquinanti, escludono una parte fondamentale della vita utile del veicolo e del vettore energetico. Un approccio più corretto è quello di un'analisi dell'intero ciclo vita del veicolo (analisi LCA) che tiene conto sia delle emissioni di gas serra derivanti dalla fabbricazione del veicolo e dei suoi componenti, sia della produzione del vettore energetico. Lo studio: "*IL RINNOVO DEL PARCO VEICOLARE ITALIANO PER UNA MOBILITÀ PIÙ SICURA, EQUA E SOSTENIBILE; (2021) [19]"* evidenzia come, confrontando un veicolo convenzionale e uno elettrico aventi mediamente lo stesso prezzo di listino, il BEV, in fase di produzione, emetta l'82% di CO_2 in più rispetto ad un veicolo a benzina (figura 17). Inoltre, confrontando (tabella 4) un BEV di fascia alta (che tipicamente è soggetto alle forme di incentivazione maggiori) con i veicoli ibridi, convenzionali e a metano di piccola taglia, risulta che proprio il veicolo elettrico abbia le maggiori emissioni di inquinanti durante il suo ciclo vita. Risultati simili sono evidenziati anche nello studio condotto da Volvo, dal titolo: *"Carbon footprint report Volvo C40 Recharge"; (2021) [20]* che spiega come, nell'intero ciclo vita del veicolo (supposto di 200000 chilometri), la Volvo XC40 a benzina emetta 59 tonnellate di CO_2 equivalente, a fronte delle 50 emesse dalla XC40 puramente elettrica. In particolare, si dimostra come

utilizzando il mix globale per la produzione di CO_2, il punto di pareggio si trovi intorno ai 110000 chilometri. I risultati sono presentati nelle figure 18 e 19.

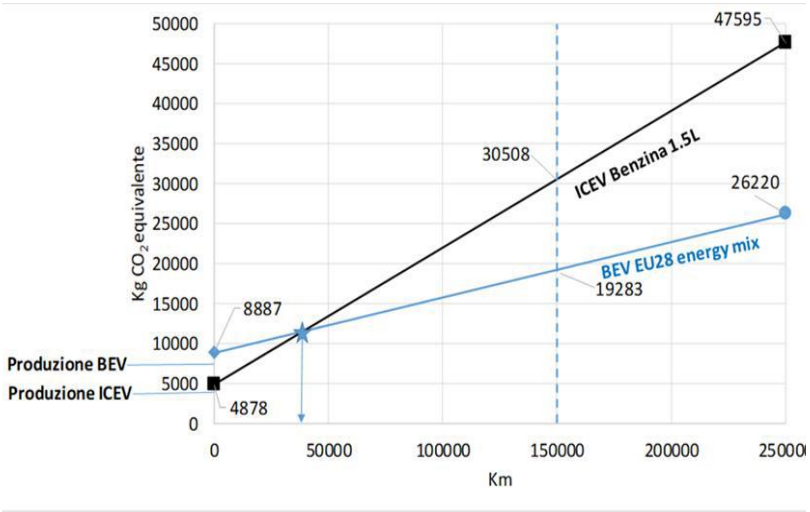


Figura 17: Confronto emissioni di CO2 durante il ciclo vita per un veicolo BEV (mix energetico europeo) e un veicolo convenzionale

Tabella 4: Emissioni di CO2 per diverse tipologie di veicolo

Modello autovettura	**Emissioni CO2 *g*km* (Val. in g.)**	**Emissioni CO2 generate in fase di produzione del veicolo (Val. in *kg*)**	**Emissioni di CO2 dei vettori energetici (Val. in *kg*)**	**Emissioni tot di CO2 A 75.000 *Km* (Val. in *kg*)**	**Emissioni tot di CO2 A 150.000 *Km* (Val. in *kg*)**	**Disponibilità attuale degli incentivi e importo con rottamazione***	**Prezzo di listino del veicolo**
Auto BEV di segmento medio alto	0	10.524	0,062	15.156	**19.789**	SI 10.440,00	50.480,00
Utilitaria ibrida HEV	0, 64	4.103	0,022	10.403	**16.703**	SI 4.190,00	21.500,00
Utilitaria a metano	0,086	4.103	0,019	11.978	**19.853**	SI 4.190,00	16.250,00
Utilitaria a benzina	0, 95	3.577	0,029	12.877	**22.177**	NO 3.940,00	11.950,00
Auto a idrogeno di segmento medio	0	4.650	0,107	12.665	**20.681**	SI 10.440,00	60.000,00

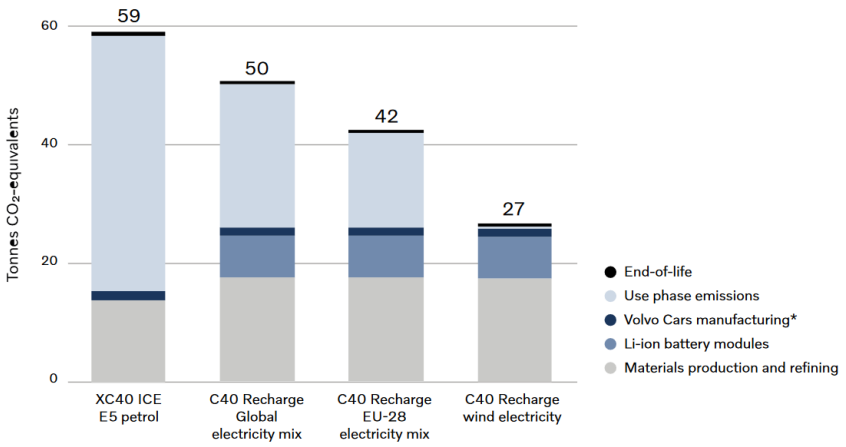


Figura 18: Ripartizione delle tonnellate di CO2 equivalenti per la Volvo XC40

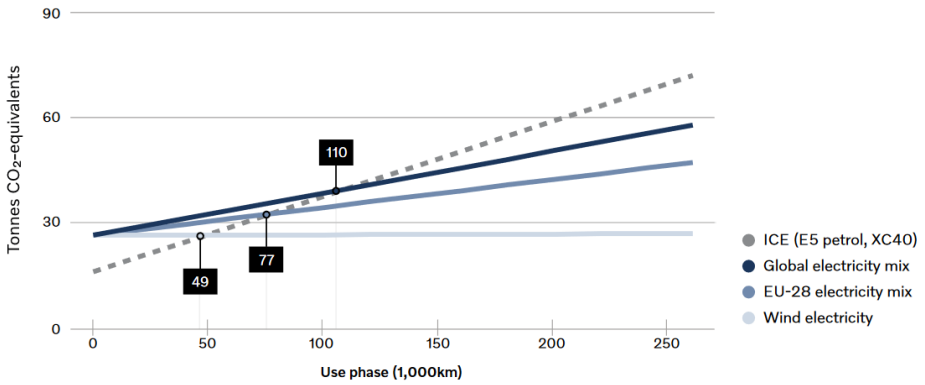


Figura 19: Break even point della CO2 equivalente per la Volvo XC40

Concludendo, per tutti i motivi evidenziati, attualmente i veicoli ibridi plug-in sembrano rappresentare la scelta migliore in termini di costo/beneficio per l'utente. Infatti, fintanto che la produzione di energia elettrica non sia realizzata esclusivamente mediante energie rinnovabili, i vantaggi in termini di emissioni derivanti dai BEVs risultano ancora troppo esigui a fronte dei limiti di questo tipo di motorizzazione. I PHEVs, invece, riescono sicuramente ad ottenere emissioni di CO_2ttw minori rispetto ai veicoli convenzionali, facendo sì che il comfort per l'utente non sia minato. Resta da capire se a fronte di un prezzo di listino maggiore rispetto ad un CICE, i vantaggi in termini di consumi possano essere tali da rendere questo acquisto non solo necessario per la tutela ambientale ma soprattutto appetibile economicamente.

5. Le architetture PHEV

Le architetture PHEV esplorate in questa tesi sono tre. Si riportano in seguito le principali caratteristiche di ciascuna architettura.

- **PHEV p2:** Questo tipo di architettura è costituita da un motore elettrico ed uno endotermico. Il motore convenzionale è collegato direttamente alle ruote, mentre il motore elettrico è montato tra il motore termico e la trasmissione. È possibile, grazie alle due frizioni, scollegare i due motori e quindi permettere tutte le modalità di guida (puro-termico, puro-elettrico, battery charging e power-split). Tutta la potenza è trasferita al primary axle. In figura 21 si riporta un veicolo che adotta questo tipo di architettura.

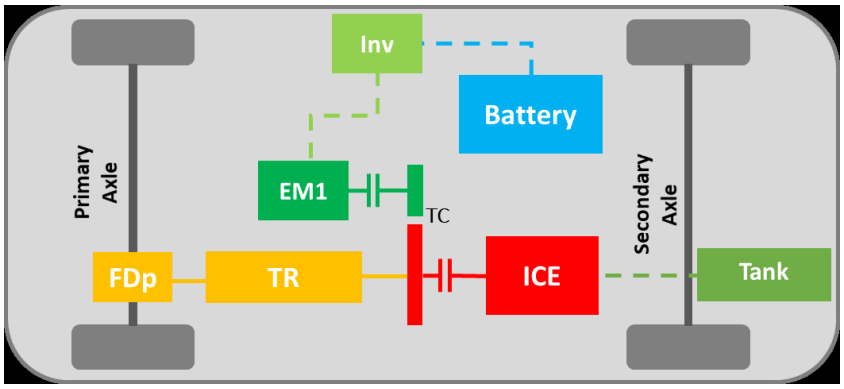


Figura 20: schema funzionale architettura PHEV p2

Figura 21: Mercedes A250e (ibrida plug-in con architettura p2)

- **PHEV p4:** Questo tipo di architettura è costituita da un motore elettrico ed uno endotermico. Il motore convenzionale è montato sull'asse primario mentre il motore elettrico su quello secondario senza che vi sia una trasmissione tra i due motori. Entrambi sono collegati direttamente alle ruote tramite una frizione che li scollega quando necessario. Come l'architettura p2, tutte le modalità di guida sono consentite. Questo tipo di architettura, con il motore elettrico sull'asse secondario è quella che consente la trazione integrale elettrica. In figura 23 si riporta un veicolo che adotta questo tipo di architettura.

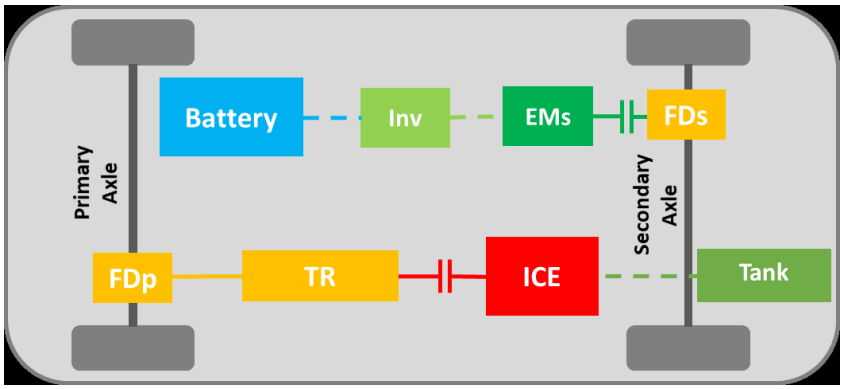


Figura 22: schema funzionale architettura PHEV p4

Figura 23: Jeep Compass 4xe (ibrida plug-in con architettura p4)

- **PHEV p2p4:** È un ibrido plug-in complesso. Unisce insieme le architetture p2 e p4 descritte precedentemente. La batteria è unica e fornisce l'energia ai due motori elettrici. Il primo motore elettrico fornisce assistenza al motore endotermico ed è collegato ad esso mediante una trasmissione. Il secondo motore elettrico si occupa esclusivamente di fornire potenza all'asse secondario. Rispetto alle architetture semplici il numero di frizioni è aumentato di un'unità. In figura 25 si riporta un veicolo che adotta questo tipo di architettura.

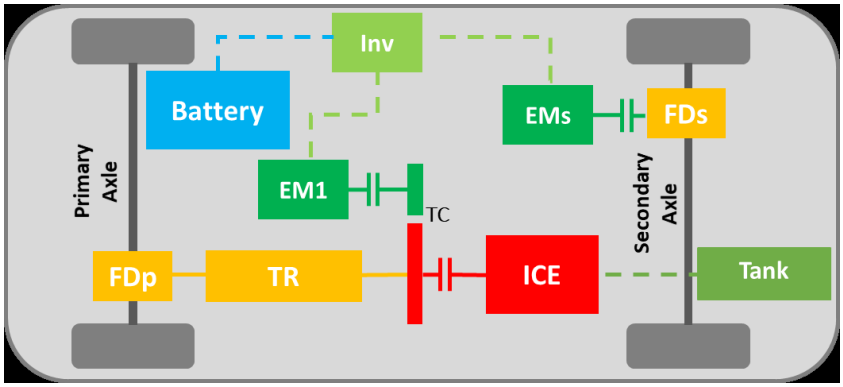


Figura 24: schema funzionale architettura PHEV p2p4

Figura 25: Suzuki Across (ibrida plug-in con architettura p2p4)

6. Modello del veicolo e software HEVBox

Al fine di poter simulare tramite software i costi del veicolo plug-in nelle sue diverse architetture, è necessario definire un modello di veicolo. Quello preso in considerazione in questo lavoro di tesi è lo stesso modello utilizzato dal tesista *Marcello Marabete* in *[6]* e consiste in un veicolo ibrido plug-in che simula il modello di una berlina. Le specifiche tecniche del veicolo utilizzato sono descritte nelle tabelle successivamente realizzate. Le caratteristiche riportate sono state utilizzate per tutte le architetture plug-in hybrid esplorate.

Tabella 5: Dati generici del veicolo

DATI GENERICI DE VEICOLO		
Peso veicolo scarico	1100	*[kg]*
Carico massimo	525	*[kg]*
Diametro ruota	0,657	*[m]*
Ruote	4	
Coeff. Inerzia ruote	1,05	*[kg*m^2]*
Resistenza al rotolamento	0,0879	*[N/kg]*
Cx (coefficiente aerodinamico)	0,25	
Sezione frontale	2,22	*[m^2]*
Distribuzione carico in frenata Fronte/Retro	0,5	
Potenza media per gli ausiliari richiesta al ICE	0	*[W]*
Potenza media per gli ausiliari richiesta alla Batteria	0	*[W]*
Coeff. Inerzia giunto cardanico	0,001	*[kg*m^2]*
Coeff. Inerzia albero cambio-ICE	0,01	*[kg*m^2]*
Consumo energetico medio della batteria	0,5	*[kWh/km]*
Efficienza ruota-differenziale	1	

Tabella 6: Dati del motore endotermico

DATI MOTORE ENDOTERMICO		
Cilindrata	1000	*[cm^3]*
Potenza	135	*[kW]*
Coeff. Inerzia	0,14	*[kg*m^2]*
Velocità minima	1000	*[rpm]*
Velocità massima	6250	*[rpm]*

Tabella 7: Dati del motore elettrico

DATI MOTORE ELETTRICO		
Potenza nominale	110	*[kW]*
Velocità massima	13000	*[rpm]*
Coeff. Inerzia	0,015	*[kg*m^2]*

Tabella 8: Dati della batteria

DATI BATTERIA		
Tensione nominale cella	3,6	*[V]*
Numero di celle per unità	6	
Capacità cella	2,9	*[Ah]*
Tensione nominale batteria	300	*[V]*
Massa della batteria	170	*[kg]*
Numero complessivo di celle	1680	
Efficienza inverter	95	*[%]*
Capacità energetica	12	*[kWh]*
PHEV_SOC limite superiore	100	*[%]*
PHEV_SOC limite inferiore	5	*[%]*
Stati di carica della batteria	201	

Tabella 9: Dati della trasmissione

DATI TRASMISSIONE									
Rapporti	1	2	3	4	5	6	7	8	
Rapporti [-]	4,714	3,143	2,106	1,667	1,285	1,000	0,839	0,667	
Efficienza [-]	0,967	0,967	0,968	0,971	0,99	0,98	0,98	0,98	
Coeff. Inerzia del cambio		0,15							*[kg*m^2]*
Coeff. Inerzia lato ruota		0,03							*[kg*m^2]*
Coeff. Inerzia lato powertrain		0,03							*[kg*m^2]*
Massa		87							*[kg]*

Tabella 10: Dati del differenziale

DATI DIFFERENZIALE		
Coeff. Inerzia lato ruota	0,004	*[kg*m^2]*
Coeff. Inerzia lato powertrain	0,002	*[kg*m^2]*
Efficienza [-]	0,98	

Per eseguire le simulazioni effettuate in questo lavoro di tesi, è utilizzato il software HEVBox, sviluppato dai dottorandi del Politecnico di Torino. Questo programma è un algoritmo di programmazione dinamica, scritto su MATLAB, grazie al quale, conoscendo a priori il percorso (in questo caso i cicli guida che saranno successivamente descritti) e monitorando una serie di variabili di controllo, è possibile realizzare una data funzione obiettivo.

I dati di input, necessari al funzionamento del programma, sono quelli descritti nelle tabelle da 5 a 10 che racchiudono le caratteristiche principali del veicolo. A questi devono essere aggiunti: lo stato iniziale di carica della batteria (che può essere variato a piacimento mediante un opportuno foglio di calcolo EXCEL), i costi del carburante e della ricarica elettrica, i chilometri annuali percorsi e ovviamente occorre selezionare, dal foglio EXCEL realizzato in seno al programma, sia la tipologia di ciclo guida sia la tipologia di architettura ibrida plug-in che si vuole utilizzare per la simulazione.

Inoltre, il software permette di tener conto anche dei costi fissi del veicolo, semplicemente inserendo la loro metodologia di calcolo nell'opportuno algoritmo.

Una volta impostati gli input il programma fornisce una grande quantità di output. Quelli su cui questo studio si concentrerà maggiormente sono:

- Il costo energetico annuale (sia totale sia indipendentemente valutato tra costo elettrico e costo del carburante tradizionale).
- Lo stato di carica finale della batteria, dopo aver percorso il ciclo.
- Le emissioni di CO_{2ttw} del veicolo, dopo aver percorso il ciclo.
- Le modalità di percorrenza dei cicli distinguibili in: puro termico, puro elettrico, battery-charging e power split.
- Le mappe motore sia del motore elettrico sia di quello endotermico.

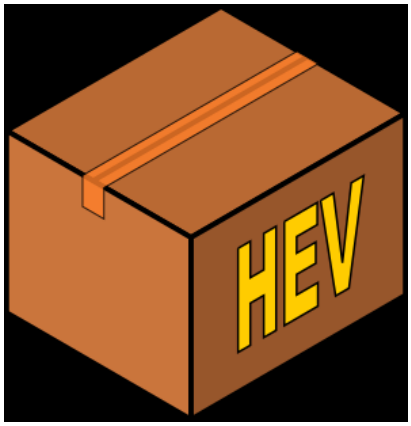


Figura 26: Software HEVBox

7. Analisi dei costi di produzione di un PHEV

Dopo aver descritto le caratteristiche tecniche del modello di ibrido plug-in sotto esame, è necessario fornire una stima del costo di acquisto del veicolo. I valori in seguito riportati sono frutto di un'approfondita analisi della letteratura esistente sui PHEVs, adattati al modello presente in questa tesi. I costi che costituiscono il valore del bene sono suddivisi in costi fissi e costi variabili sulla base della loro natura.

In questo paragrafo vengono analizzati esclusivamente i costi fissi in quanto costituenti del costo di listino del veicolo. I costi variabili (in particolare i costi operativi energetici), invece, sono approfonditi nei capitoli successivi.

In questa analisi non si effettuano distinzioni tra le architetture p2, p4 e quella complessa p2p4 poiché la natura di questa descrizione è puramente indicativa in quanto non si dispone dei reali costi di produzione del veicolo.

Si riportano in seguito le diverse componenti di costo.

7.1 Costi fissi

Per quanto concerne i costi fissi si è fatto riferimento agli articoli *"On Modeling the Cost of Ownership of Plug-in Vehicles; [9]"*, *"Update on electric vehicle costs in the United States through 2030"; [21]* e *"Electric Vehicle Teardown"; [22].* Tali studi, sebbene con le dovute differenze, hanno permesso la comprensione del costo di produzione del veicolo fornendo un database di dati utilizzabili per il modello discusso in questa tesi.

Questi comprendono:

1. Il costo diretto ed indiretto (circa il 40% del costo totale di produzione) per la produzione del veicolo. Questi raggruppano, rispettivamente, il costo del lavoro, di assemblaggio del veicolo e i costi non direttamente attribuibili al veicolo come ricerca e sviluppo, ammortamento e spese amministrative. Non è possibile risalire ai valori reali di queste due componenti di costo per un veicolo simile a quello in esame; tuttavia, lo studio di UBS, ripreso da ICCT calcola i costi diretti ed indiretti reali della Chevrolet Bolt. Per tener conto di questa discrepanza, I costi sono poi incrementati

percentualmente vista la maggiore footprint del modello del veicolo utilizzato in questa sede. Come tali, i dati vanno presi come puramente indicativi.

2. Costo del motore endotermico, del motore elettrico e della trasmissione (del tipo multi – speed o continuous variable speed). I costi di produzione di ciascuno di questi componenti sono stimati mediante un modello del primo ordine in funzione dei *[kW]* del veicolo.
3. Costo della batteria. Questi tengono anche conto di connettori, celle, packaging e sistema di trattamento termico. A questo valore è poi aggiunto il costo della componentistica elettrica, interna al veicolo, per effettuare la ricarica.
4. Costi di mercato, che includono il margine di profitto delle compagnie automobilistiche e del venditore del veicolo. La stima di questi costi è complessa e, in accordo con quanto fornito in letteratura e quanto stimato precedentemente nell'HEVBox, sono valutati in percentuale. Il primo è una percentuale del costo base di produzione del veicolo, il secondo una percentuale, applicata dal venditore, che contribuisce nel determinare il prezzo di listino del veicolo.
5. Costo delle tasse. Si è considerata, per la determinazione del costo totale iniziale, il costo dovuto all'IVA, valutata come il 22% del costo totale di produzione.

Si riportano in tabella 11 i costi fissi per questo modello di veicolo e in figura 27, 28 e 29: il costo totale di produzione, la percentuale dei diversi costi di produzione e il costo totale iniziale.

Infine, per quanto riguarda la conversione euro – dollaro è utilizzato un fattore di conversione del tipo:

$$1\ Euro = 1{,}19\ US\ Dollar$$

Tabella 11: calcolo dei costi fissi per questa tipologia di veicolo

COSTI	VALORE	UNITA' DI MISURA
COSTO DIRETTO	11700	*[euro]*
COSTO INDIRETTO	8190	*[euro]*
MOTORE TERMICO	$845 + 21{,}3\ \frac{\$}{kW_{ice}}$	*[$]*
MOTORE ELETTRICO	$300 + 22{,}3\ \frac{\$}{kW_{el}}$	*[$]*
TRASMISSIONE	$580 + 14{,}6\ \frac{\$}{kW_{ice}}$	*[$]*
COSTO BATTERIA	$235{,}2\ \frac{\$}{kWh}$	*[$]*
COSTO COMPONENTISICA ELETTRICA	423	*[$]*
OEM MARKUP	25%	
DEALER MARKUP	5%	
IVA	22%	

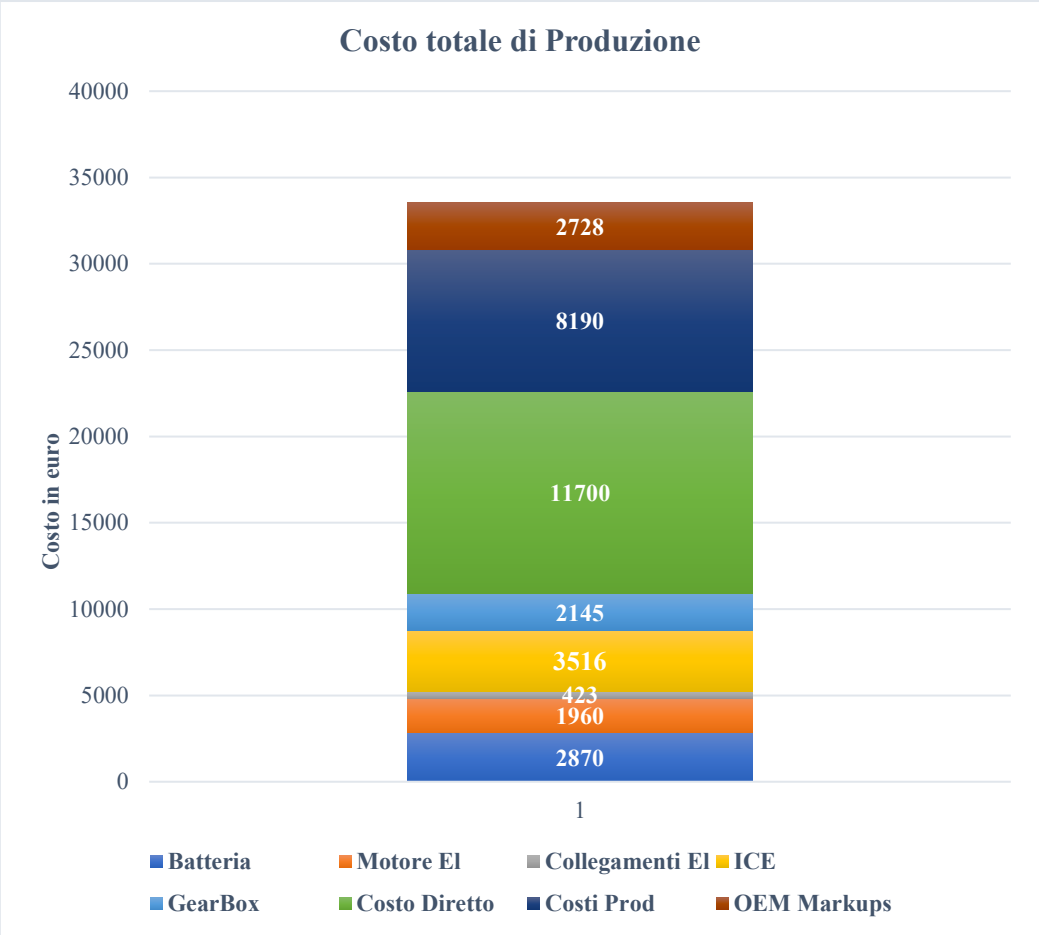


Figura 27: costo totale di produzione

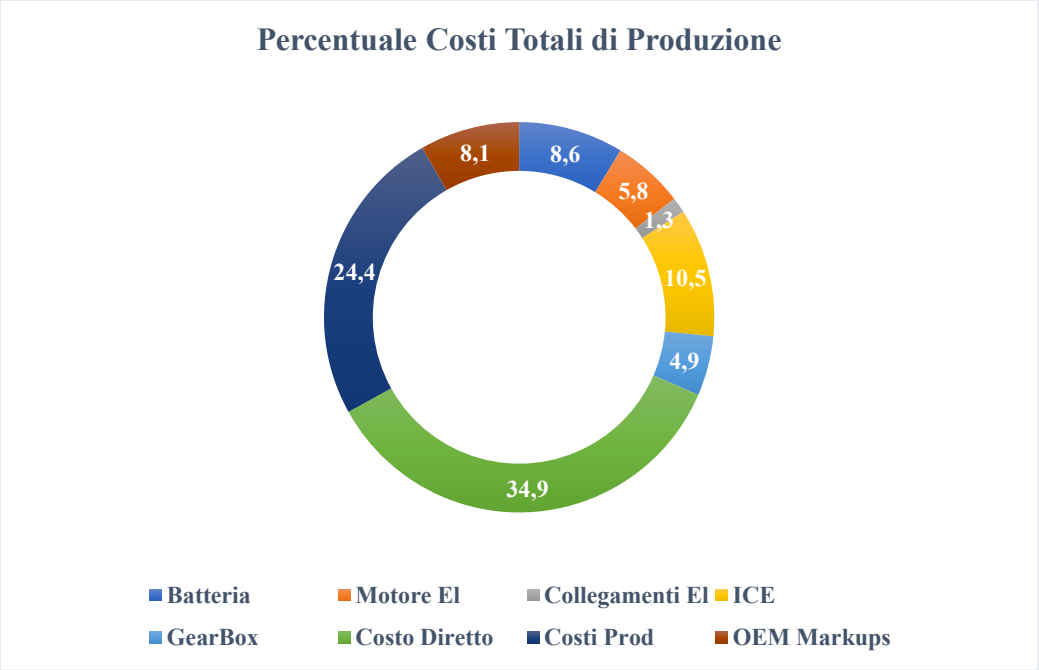


Figura 28: Percentuale costi totali di produzione

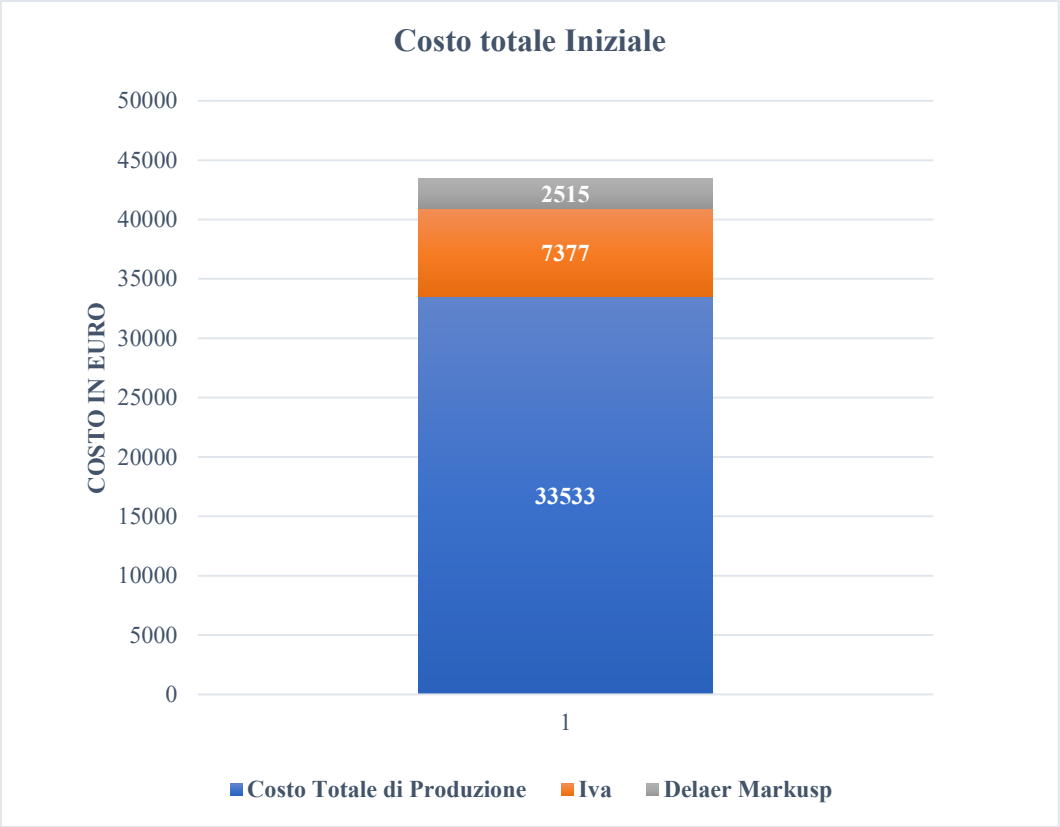


Figura 29: costo totale iniziale

Il costo totale, come è possibile osservare dal grafico in figura 30, si colloca perfettamente sulla media dei prezzi dei moderni veicoli ibridi plug-in. I prezzi oscillano in un intervallo molto ristretto, questo poiché tipicamente la motorizzazione ibrida plug-in è implementata su veicoli di grossa taglia (SUV e berline di alta gamma).

È possibile, inoltre, effettuare un confronto con i prezzi di acquisto di alcuni BEVs (figura 31). I veicoli elettrici scelti sono, secondo i dati di *Motus-E*, i modelli più acquistati in Italia. Come è ampiamente preventivabile, all'aumentare dell'autonomia dichiarata il prezzo di acquisto del veicolo sale di molto.

Si può osservare come, se da un lato il prezzo degli ibridi plug-in sia in partenza più alto della media dei BEVs, è altresì vero che il confronto deve essere realizzato su veicoli della stessa tipologia e segmento. Non è infatti ragionevole pensare che un utente che ha in mente di comprare un SUV abbia come altra opzione una city car puramente elettrica. Per tale motivo, risulta che, il prezzo di listino dei veicoli dello stesso segmento, puramente elettrici e ibridi plug-in, sia ampiamente paragonabile.

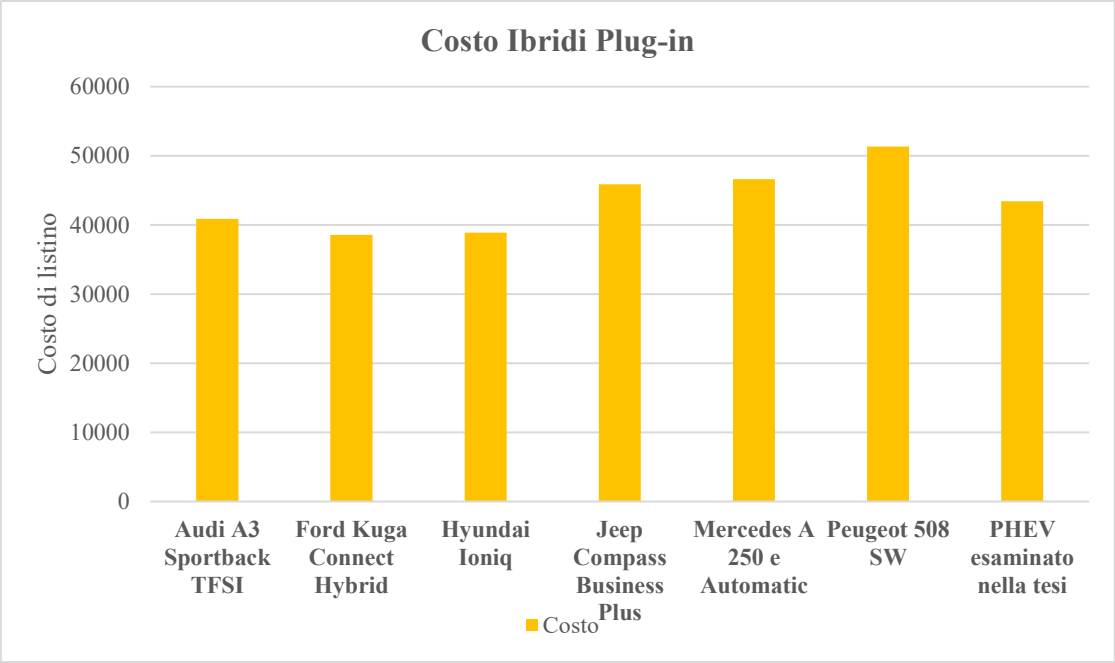


Figura 30: Costo di alcuni ibridi plug-in disponibili sul mercato

Tabella 12: caratteristiche di alcuni ibridi plug-in disponibili sul mercato

	Autonomia Elettrica ***[km]***	**Costo** ***[euro]***
Audi A3 Sportback TFSI	60	40900
Ford Kuga Connect Hybrid	88	38550
Hyundai Ioniq	63	38900
Jeep Compass Business Plus	50	45890
Mercedes A 250 e Automatic	70	46600
Peugeot 508 SW	52	51350

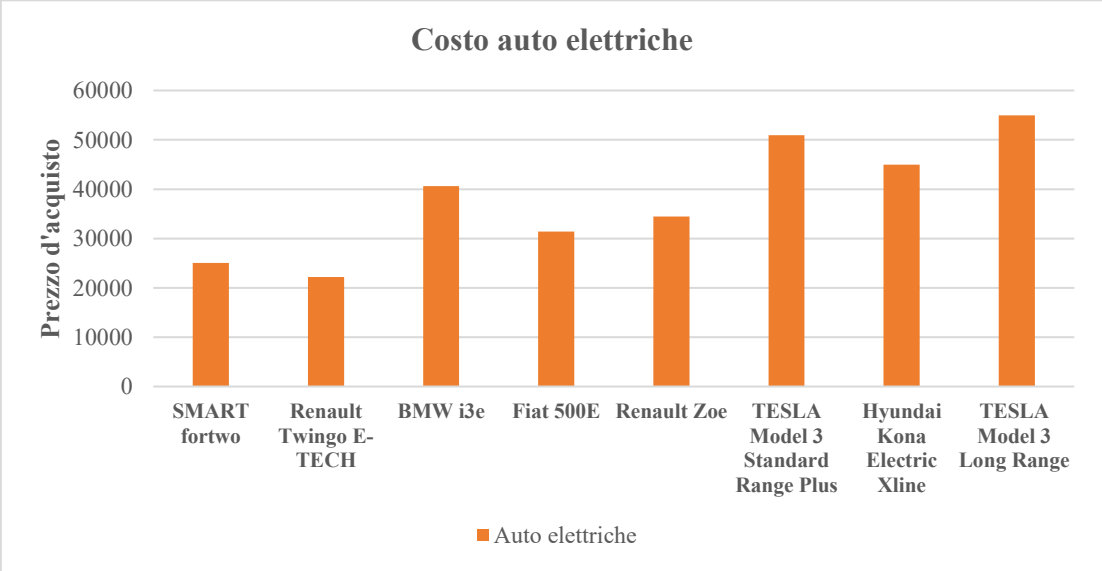


Figura 31: Costo di alcuni BEV disponibili sul mercato

Tabella 13: caratteristiche di alcuni BEV disponibili sul mercato

	Tipo di BEV	**Capacità batteria *[kWh]***	**Costo *[euro]***
SMART fortwo	**BEV150**	17,6	25026
Renault Twingo E-TECH	**BEV250**	22	22200
BMW i3e	**BEV 300**	42	40.600
Fiat 500E	**BEV300**	42	31400
Renault Zoe	**BEV400**	52	34450
TESLA Model 3 Standard Range Plus	**BEV450**	54	50.970
Hyundai Kona Electric Xline	**BEV500**	64	45000
TESLA Model 3 Long Range	**BEV600**	82	54990

8. Analisi del costo operativo di un veicolo PHEV

Il costo operativo nel tempo è probabilmente quello che più impatta la scelta finale dell'acquirente; infatti, spesso, averne accurate informazioni a riguardo può fare da ago della bilancia per l'acquisto.

Nel campo automotive, conoscere il costo operativo del veicolo negli anni è tutt'altro che semplice in quanto, in gran parte, è dipendente dalle abitudini e dalla frequenza di guida dell'utente. Fattori come il tipo di percorso scelto, la modalità di guida (che può essere più o meno aggressiva), il traffico, lo stato di carica della batteria (per i veicoli PHEVs), sono dei contributi fondamentali per la valutazione dei consumi (e quindi dei costi operativi) di un veicolo. La simulazione di questi ultimi è, per tale ragione, estremamente complessa poiché dipende in gran parte da fattori soggettivi che, come tali, variano da utente ad utente. Per dare quindi una stima del costo operativo del veicolo occorre introdurre i cicli guida, ossia dei profili di velocità nel tempo che simulano il percorso compiuto dall'utente su strada e le modalità di guida adottate (frenate, accelerazioni, fasi di sosta, ecc.).

In questo capitolo, dunque, si procederà, dopo aver definito i cicli guida scelti, alla valutazione del costo operativo delle tre architetture ibride plug-in scelte. In particolare, mediante il software HEVBox si calcoleranno i costi delle due fonti energetiche (carburante e ricarica elettrica) separatamente ed i costi energetici totali, sia al variare della potenza con cui è effettuata la ricarica elettrica, sia al variare dello state of charge della batteria. Infatti, per i veicoli PHEVs, la percentuale di carica della batteria influenza pesantemente la modalità di guida del veicolo. Per tale motivo, al ridursi dello S.o.C il software introdurrà sempre più frequentemente le funzioni di puro-termico e battery charging che, invece, saranno meno frequenti in caso di batteria vicina al 100%. Dall'altro lato, come si potrà facilmente osservare nel seguito, scegliere se effettuare la ricarica elettrica dall'abitazione privata (o dall'azienda privata) piuttosto che da un'infrastruttura pubblica farà un'enorme differenza in termini di costo operativo del veicolo.

8.1 Cicli guida

In questo paragrafo si presentano i tre cicli guida utilizzati per effettuare il calcolo dei costi energetici. Un ciclo guida è un profilo di velocità nel tempo ed è essenziale per testare il veicolo (o il motore) in laboratorio. Tipicamente ci si avvale del loro utilizzo ai fini della valutazione delle emissioni di CO_2ttw e degli inquinanti primari come previsto dalla normativa ma, in questo lavoro di tesi, sono utilizzati come semplici profili di guida su cui effettuare la valutazione dei costi energetici. Per tale motivo, la scelta è ricaduta su tre cicli guida differenti: il WLTP, il ciclo UEUC ed il ciclo autostradale HIGHWAY, in modo da poter osservare come i veicoli e le architetture testate si comportino in diversi scenari.

Vengono presentati in seguito i cicli guida menzionati.

8.1.1 Ciclo WLTP

La procedura WLTP (*Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Procedure*), introdotta dal 2017 per i nuovi veicoli immatricolati, è preferita al ciclo NEDC per fini omologativi in quanto meglio rappresenta le condizioni reali di guida.

Il ciclo è composto da quattro sezioni: Low, Medium, High, Extra-high.

Durante la procedura normativa, in base alla classe del veicolo, si sceglie con quali di queste sezioni testare il veicolo. La scelta dipende da un parametro noto come PMR (*power to mass ratio*) calcolato come il rapporto tra potenza del motore e massa in ordine di marcia (ossia la massa del veicolo non considerando il peso del guidatore e di altri passeggeri, il serbatoio pieno al 90%, ruota di scorta e senza considerare il peso di acqua ed olio). In particolare:

1. Se PMR ≤ 22 si effettuano solo le sezioni Low e Medium (Classe 1);
2. Se 22 < PMR < 34 si effettuano solo le sezioni Low, Medium e High (Classe 2);
3. Se PMR ≥ 34 il ciclo è considerato nella sua totalità (Classe 3).

Nei paesi europei non si registrano veicoli al di fuori della classe 3 e quindi il ciclo viene sempre utilizzato, per fini omologativi, nella sua totalità.

La procedura WLTC fornisce un metodo per il calcolo dei punti di cambio marcia ottimali che tiene conto del peso del veicolo e delle curve di potenza.

Si riportano in tabella 14 alcuni dati caratteristici del ciclo guida in esame.

Tabella 14: caratteristiche della procedura WLTC

CARATTERISTICHE CICLO WLTC								
PHASE	**DURATION**	**STOP DURATION**	**DISTANCE**	**% STOP**	**V_MAX**	**V_MEDIA**	**A_MIN**	**A_MAX**
	[s]	*[s]*	*[m]*		*[km/h]*	*[km/h]*	*[m/s^2]*	*[m/s^2]*
Low	589	156	3095	26,5	56,5	18,9	-1,47	1,47
Medium	433	48	4756	11,1	76,6	39,5	-1,49	1,57
High	455	31	7158	6,8	97,4	56,6	-1,49	1,58
Extra-High	323	7	8254	2,2	131,3	92	-1,21	1,03
Total	1800	242	23262					

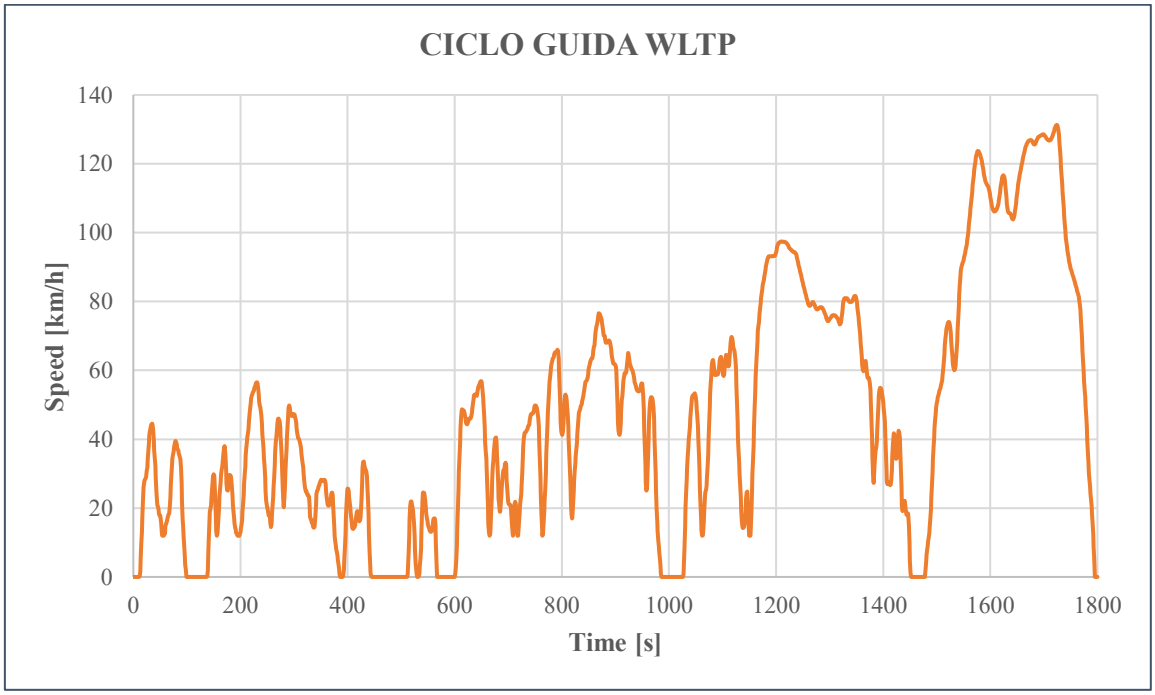


Figura 32: Ciclo guida WLTC

8.1.2 Ciclo UEUC

Il profilo di velocità riportato in figura 33 è denominato UEUC (*Urban Extra-urban cycle*) ed è mutuato dal lavoro di Tesi di Marcello Marabete, il quale ha costruito questo ciclo a partire da profili guida reali seguendo il criterio della maggior rilevanza statistica. In questo modo è possibile ottenere un ciclo guida che ben condensi i dati reali e che quindi fornisca un'indicazione effettiva di un modello di guida urbano ed extra-urbano.

Il ciclo è inoltre realizzato in modo tale da iniziare con un profilo di guida urbano e terminare con uno extra-urbano.

In tabella 15 sono riportate le caratteristiche del ciclo UEUC.

Tabella 15: caratteristiche del ciclo UEUC

CARATTERISTICHE CICLO UEUC		
PERCORRENZA TOTALE	25,8	*[km]*
DURATA TOTALE	2685	*[s]*
PERCORRENZA TRATTO URBANO	2,6	*[km]*
DURATA TRATTO URBANO	475	*[s]*
PERCORRENZA TRATTO EXTRAURBANO	23,2	*[km]*
DURATA TRATTO EXTRAURBANO	2210	*[s]*
RANGE VELOCITA' URBANO	0-50	*[km/h]*
RANGE VELOCITA' EXTRAURBANO	0-101	*[km/h]*
VELOCITA' MASSIMA	101	*[km/h]*
VELOCITA' MEDIA	34,6	*[km/h]*
ACCELERAZIONE MASSIMA	3,6	$[m/s^2]$
ACCELERAZIONE MINIMA	-3,5	$[m/s^2]$
TEMPO A VELOCITA' COSTANTE	43	*[s]*
TEMPO FASI DI ACCELARAZIONE	1115	*[s]*
TEMPO FASI DI DECELERAZIONE	1152	*[s]*
TEMPO DI SOSTA	375	*[s]*

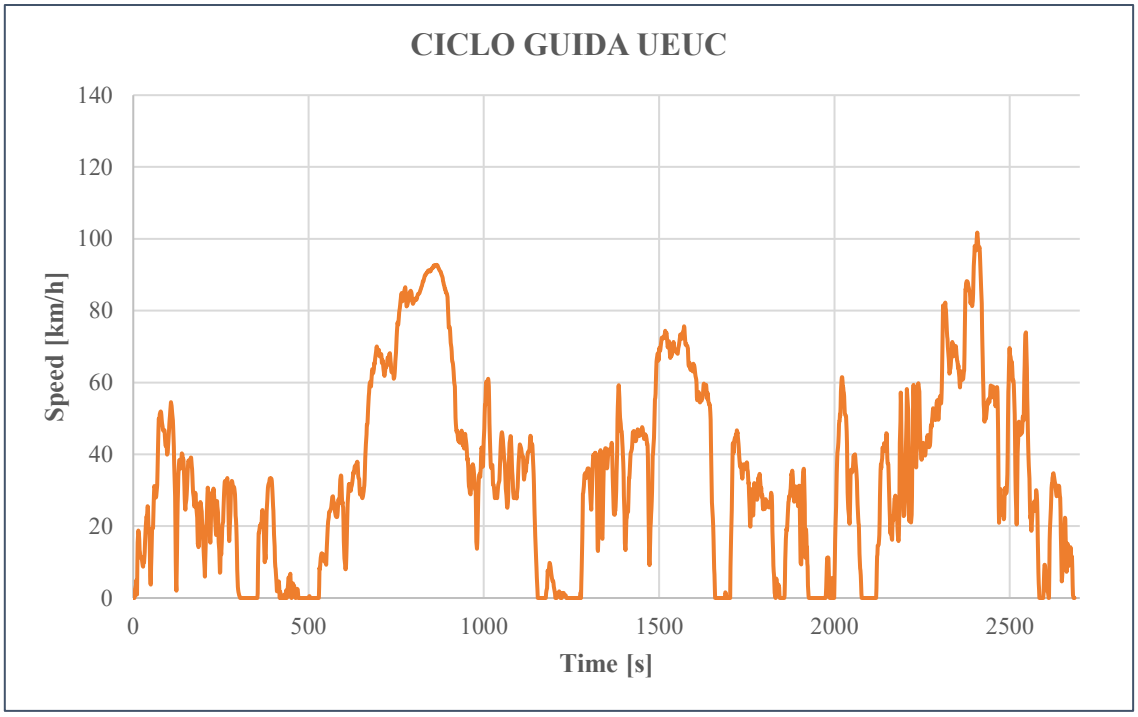


Figura 33: Ciclo guida UEUC

8.1.3 Ciclo HIGHWAY

Il terzo ciclo guida scelto, e denominato Highway, deriva dal lavoro di Tesi *"Migration of road transport towards hybrid powertrain solution" 2016 [23]* ed è un profilo reale di guida autostradale. Le caratteristiche di questo ciclo sono riportate in tabella 16.

Tabella 16: Caratteristiche ciclo guida HIGHWAY

CARATTERISTICHE CICLO HIGHWAY		
PERCORRENZA TOTALE	107,61	*[km]*
DURATA TOTALE	4804	*[s]*
VELOCITA' MASSIMA	138	*[km/h]*
VELOCITA' MEDIA	80,62	*[km/h]*
ACCELERAZIONE MASSIMA	2,34	*[m/s²]*
ACCELERAZIONE MINIMA	-3,71	*[m/s²]*
TEMPO A VELOCITA' COSTANTE	87	*[s]*
TEMPO FASI DI ACCELARAZIONE	2390	*[s]*
TEMPO FASI DI DECELERAZIONE	2110	*[s]*
TEMPO DI SOSTA	217	*[s]*

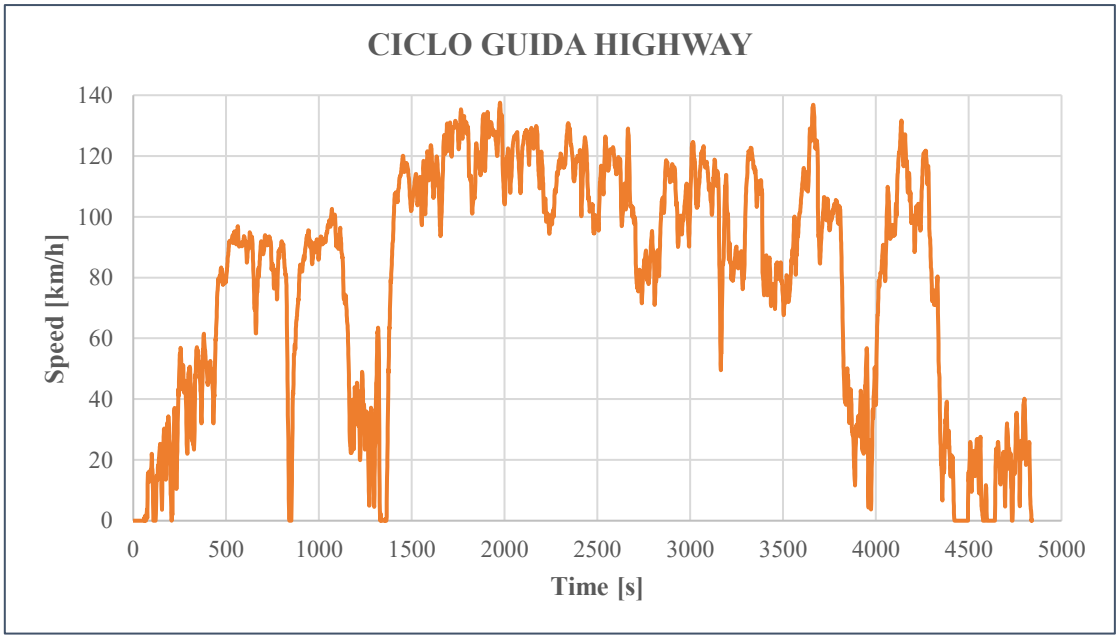


Figura 34: ciclo guida HIGHWAY

8.2 Metodologia di calcolo dei costi energetici

A questo punto è possibile svolgere l'analisi che ha come scopo la determinazione dei costi energetici in funzione dello state of charge iniziale della batteria ed in funzione della potenza con cui la ricarica elettrica è effettuata. Il calcolo è condotto sui tre differenti cicli guida precedentemente definiti e le architetture PHEVs analizzate sono: il PHEV p2, il PHEV p4 ed il PHEV complesso p2p4. La percorrenza annuale su cui si è realizzato il lavoro presentato in questo capitolo è di 33000 *[km]* e l'efficienza con cui è effettuato il rifornimento è pari ad 1. Quest'ultima ipotesi, sebbene sia valida per il rifornimento del combustibile convenzionale, è un po' meno realistica in caso di ricarica elettrica, in quanto, in realtà, vi è dell'energia persa sottoforma di calore quando si ricarica la batteria.

I costi energetici sono calcolati sia indipendentemente, evidenziando le differenze tra costo elettrico, dipendente dalle modalità di ricarica, rispettivamente domestica, ricarica pubblica AC e DC, e costo del carburante tradizionale (benzina), sia complessivamente, fornendo un resoconto sui costi energetici totali annuali.

Come già menzionato, per il calcolo dei costi energetici è stato utilizzato il software HEVBox che valuta il costo energetico per una singola missione mediante il tool di ottimizzazione ed in base al costo del combustibile e del costo dell'energia elettrica. In particolare, per il calcolo dei costi annuali si è proceduto in questo modo:

$$Costo_{el\ annuale\ domestico} = Costo_{elettrico\ per\ missione} * \frac{VMT}{L}\ ; \qquad (1)$$

$$Costo_{comb\ annuale} = Fuel\ price * FC_{per\ missione} * \frac{VMT}{L}; \qquad (2)$$

$$Costo_{el\ annuale\ AC\ o\ DC} = Costo_{el\ annuale\ domestico} * \frac{Costo\ ricarica_{AC\ o\ DC}}{Costo\ ricarica_{domestica}}\ ; \qquad (3)$$

$$Costo_{\ totale\ annuale} = Costo_{comb\ annuale} + Costo_{el\ annuale}\ (o\ domestico\ o\ AC\ o\ DC)\ ; \qquad (4)$$

con:

- *VMT*: vehicle miles traveled (in questo caso 33000 *[km]*);
- *L*: lunghezza del ciclo guida;
- *FC*: fuel consumption *[L]*;
- $Fuel\ price$: costo del combustibile tradizionale *[euro]*;

Il costo dell'energia è valutato secondo quelli che sono i prezzi medi in letteratura:

Tabella 17: costi energetici

COSTI ENERGETICI		
Costo elettrico medio domestico	**0,21**	***[Euro/kWh]***
Costo elettrico medio ricarica AC	**0,45**	***[Euro/kWh]***
Costo elettrico medio ricarica DC	**0,5**	***[Euro/kWh]***
Costo combustibile	**1,6**	***[Euro/litro]***

Il calcolo descritto è eseguito più volte riducendo, ogni volta, lo S.o.C della batteria di un 5% sui cicli WLTC e UEUC, e del 10% su HIGHWAY, in modo tale da poter mappare accuratamente i costi energetici al variare del livello di carica della batteria. Così facendo il calcolo è ripetuto in 17 punti di interesse sui primi due cicli e in 10 sul ciclo HIGHWAY.

Dall'analisi condotta si è osservato sia come le architetture PHEVs abbiano andamenti simili nei costi energetici e nei costi energetici totali (sebbene la posizione del motore elettrico influenzi in maniera non trascurabile i costi operativi annuali), sia come la tipologia di ricarica elettrica effettuata influisca molto sui costi operativi annuali rendendo, in caso di ricarica elettrica pubblica o pubblica ad uso privato AC o DC, preferibili soluzioni con batteria scarica e, come tali, più inquinanti.

8.3 Costo energetico totale ed annuale

In questo paragrafo sono tratteggiati gli andamenti del costo energetico, indipendentemente valutato, e del costo totale per le tre architetture PHEVs in esame sui tre cicli guida.

Si è osservato che, sui cicli WLTC a singola percorrenza ed UEUC, le tre architetture presentano un comportamento che è riassumibile considerando tre intervalli di S.o.C iniziale di interesse:

- S.o.C compreso tra il 95% e 55-50%.
- S.o.C compreso tra 50% - 30-25%.
- S.o.C minore del 20%.

Si evidenzia, dai grafici riportati in seguito, come la prima zona sia caratterizzata da consumi e costi energetici pressoché costanti al variare dello S.o.C. Questo è dovuto al fatto che i due cicli in esame (di lunghezza rispettivamente di circa 23 *[km]* e 25 *[km]*) sono ampiamente percorribili dai PHEVs, la maggior parte del tempo e in questo intervallo di S.o.C, in puro elettrico con l'ausilio del motore termico solo in alcune condizioni e quasi esclusivamente in "power-split" e, raramente, in "battery-charging". Tuttavia, quest'ultimo, in questa zona d'interesse, sebbene venga azionato con minor frequenza rispetto al motore elettrico, lavora in punti a bassa efficienza e per tale ragione i costi energetici derivanti dal combustibile tradizionale non sono affatto trascurabili.

La seconda zona di interesse è caratterizzata dal fatto di risultare la più efficiente in termini di costo energetico e totale annuale in quanto, da un lato la batteria è sufficientemente carica per far sì che il motore elettrico sia il prevalente e possa lavorare ad alta efficienza, dall'altro il motore termico è azionato ancor meno rispetto alla prima zona di interesse (lavora solo nell'ultima porzione di ciclo in parte in "puro-termico" in parte in "power-split") e a maggior efficienza. Questo comportamento è spiegabile dal fatto che, non essendo i cicli WLTC e UEUC particolarmente aggressivi, al fine di tener bassi i consumi, il sistema di controllo sceglie di minimizzare l'uso del motore termico e lasciar scaricare completamente o quasi la batteria. Questo insieme di fattori sottolinea come, non sempre la condizione preferibile in termini di consumo energetico sia quella con batteria carica al massimo per un ibrido plug-in. Ciò rende questo tipo di veicolo, soprattutto sulle distanze quotidiane, estremamente versatile e molto competitivo.

Infine, nel terzo range di interesse, si manifesta la preponderanza del motore termico, in termini di contributo al funzionamento, rispetto all'elettrico. La modalità più frequente con cui è azionato il motore termico è il "puro-termico". È tuttavia importante osservare come, qualora la ricarica elettrica non venga effettuata ad un prezzo competitivo, i costi totali annuali in caso di S.o.C minimo raggiungano valori molto inferiori rispetto ai costi totali in caso di S.o.C del 95%.

Per quanto concerne il calcolo condotto in questo paragrafo sul ciclo guida HIGHWAY, essendo il ciclo più aggressivo e più lungo si è ritenuto opportuno riportare per una sola modalità di funzionamento, le mappe motore con S.o.C iniziale della batteria pari al 70%. Infatti, il livello di carica della batteria dopo che il ciclo è percorso risulta essere il minimo a prescindere dallo S.o.C iniziale. Si evidenzia, per i PHEVs in esame, una crescita lineare nel consumo di combustibile tradizionale ed una conseguente decrescita lineare nel consumo di energia elettrica al ridursi dello S.o.C iniziale. Questi andamenti, però, hanno come conseguenza una crescita lineare nei costi energetici totali solo in caso di ricarica elettrica a basso costo domestica e non in caso di ricarica elettrica AC e DC dove, nel primo caso i costi totali sono costanti al variare dell'S.o.C iniziale mentre nel secondo caso addirittura diminuiscono. Il motore termico lavora, per ciascun PHEV, in ogni modalità possibile e il sistema di controllo prevede che, indipendentemente dallo S.o.C iniziale, la batteria venga scaricata completamente. Il motivo di ciò è che questo ciclo guida è caratterizzato da una lunghezza in chilometri sensibilmente maggiore rispetto all'autonomia della batteria elettrica tipicamente installata su un PHEV.

Si riportano, successivamente, nei paragrafi dedicati ai diversi cicli guida, i grafici raffiguranti i costi energetici annuali in funzione dello S.o.C, i costi energetici annuali totali sempre in funzione dello S.o.C. e le modalità di percorrenza dei diversi cicli guida con S.o.C relativi a ciascun intervallo di interesse.

8.3.1 Ciclo guida WLTC a singola percorrenza

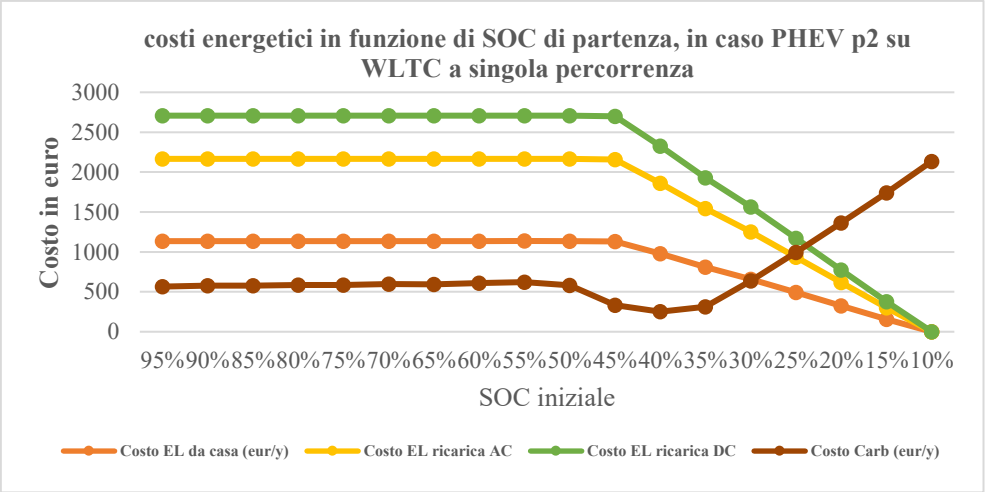


Figura 35: costi energetici in funzione di SOC di partenza, in caso PHEV p2 su WLTC a singola percorrenza

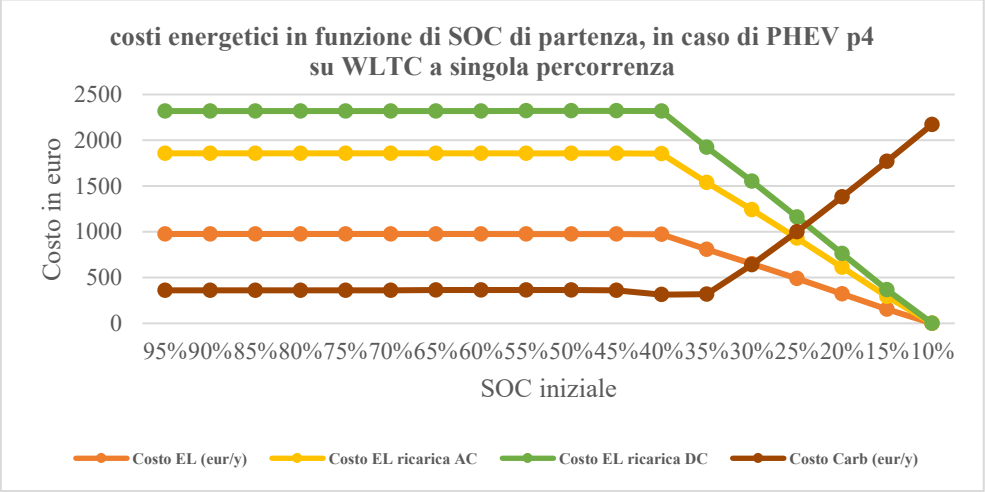


Figura 36: costi energetici in funzione di SOC di partenza, in caso PHEV p4 su WLTC a singola percorrenza

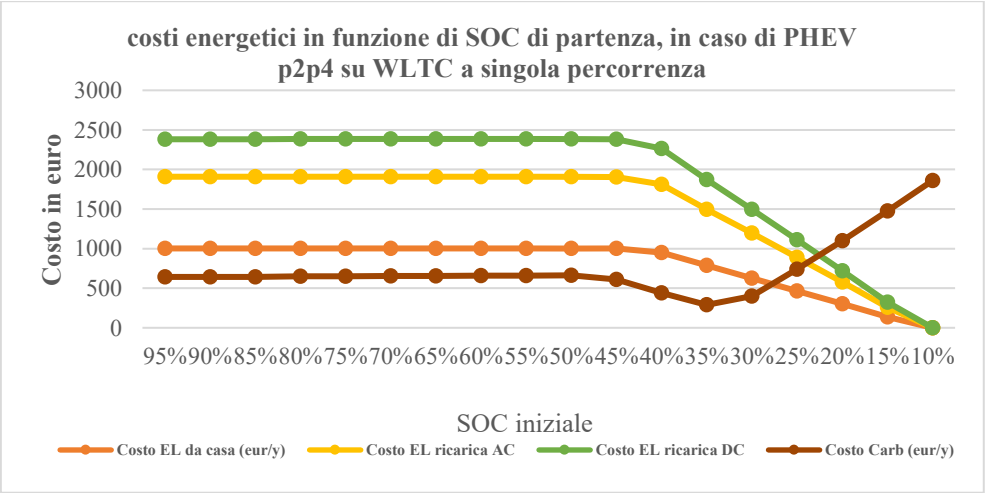


Figura 37: costi energetici in funzione di SOC di partenza, in caso PHEV p2p4 su WLTC a singola percorrenza

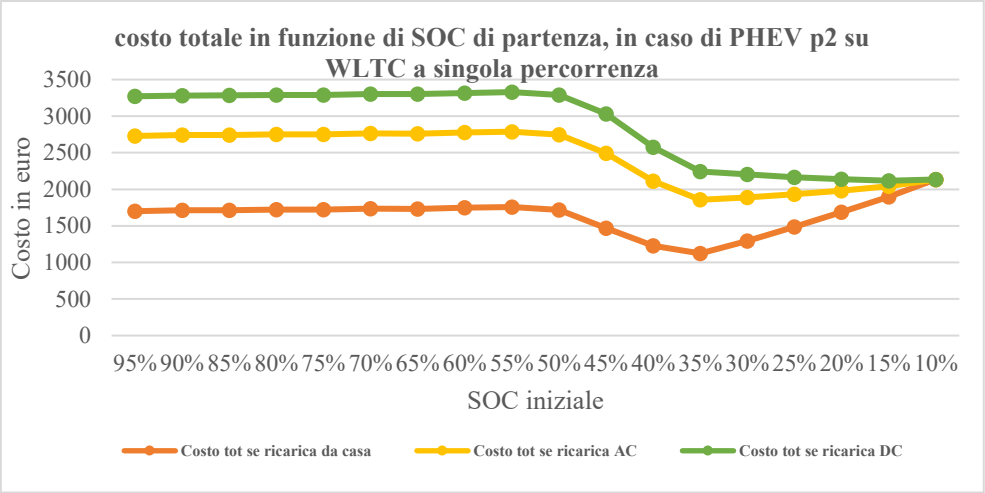


Figura 38: costo totale in funzione di SOC di partenza, in caso di PHEV totale in p2 su WLTC a singola percorrenza

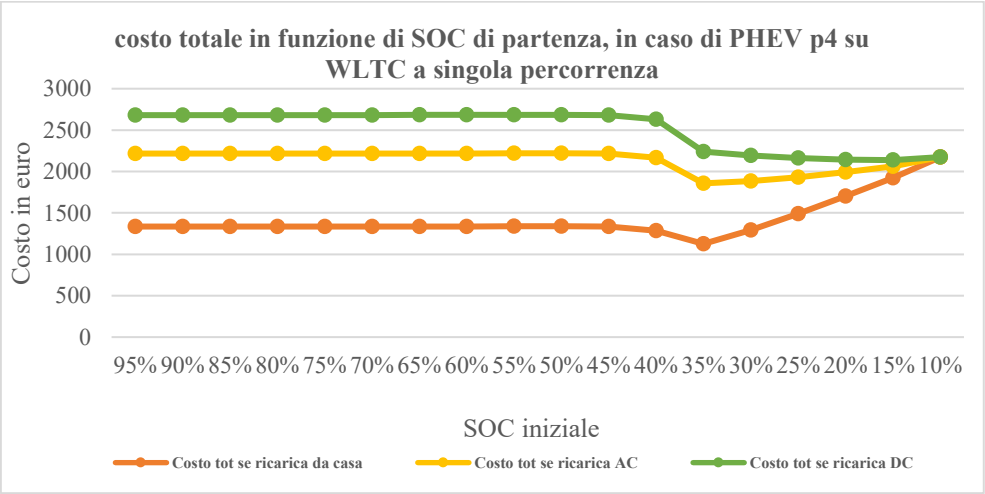


Figura 39: costo totale in funzione di SOC di partenza, in caso di PHEV totale in p4 su WLTC a singola percorrenza

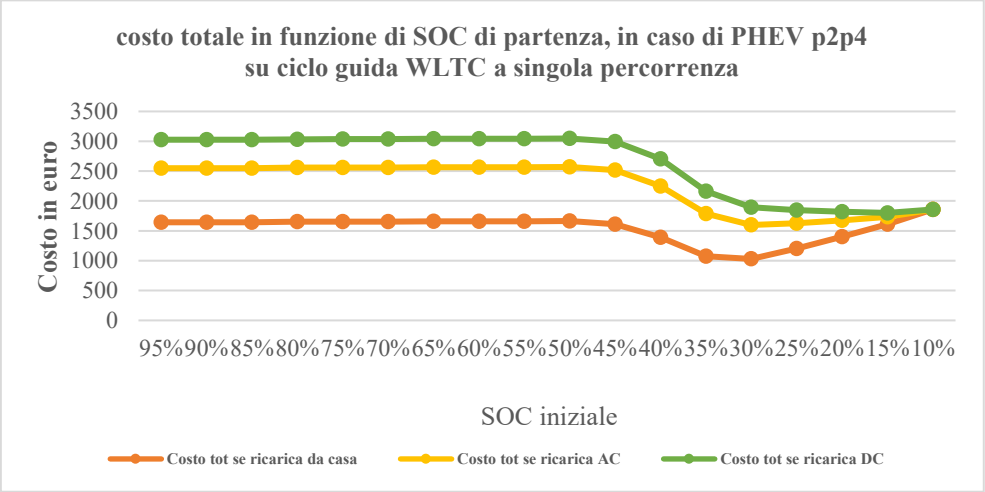


Figura 40: costo totale in funzione di SOC di partenza, in caso di PHEV totale in p2p4 su WLTC a singola percorrenza

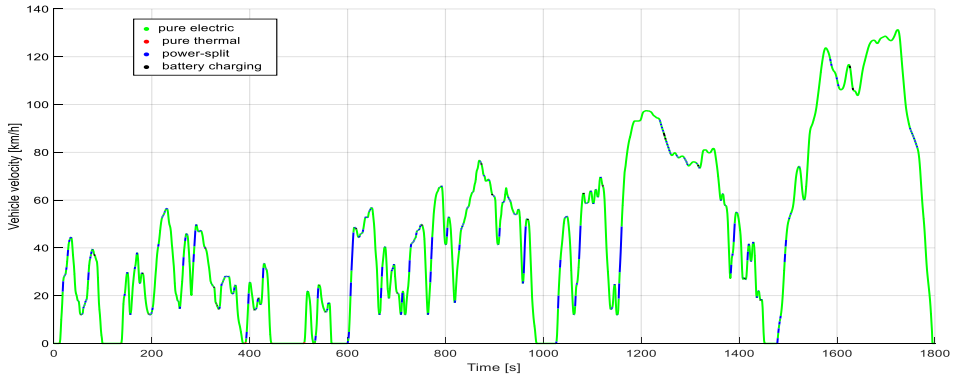


Figura 41: mappa WLTC a singola percorrenza PHEV p2 S.o.C 70%

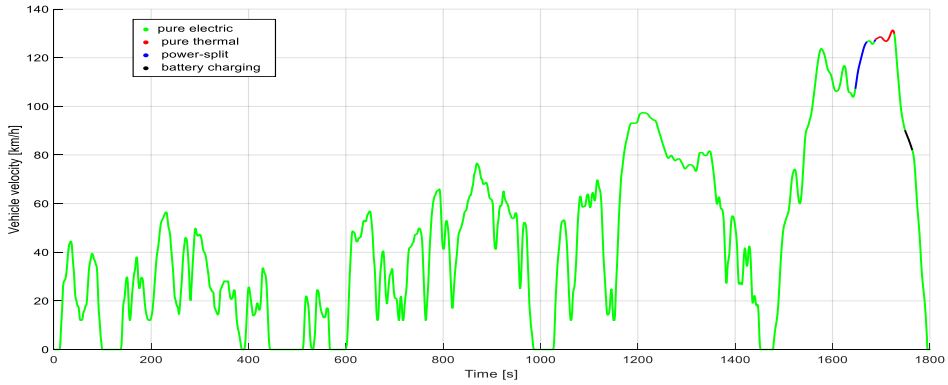


Figura 42: mappa WLTC a singola percorrenza PHEV p2 S.o.C 35%

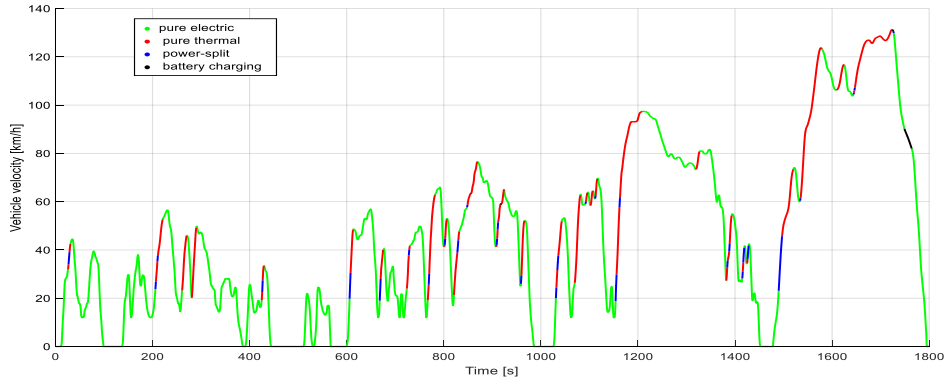


Figura 43: mappa WLTC a singola percorrenza PHEV p2 S.o.C 10%

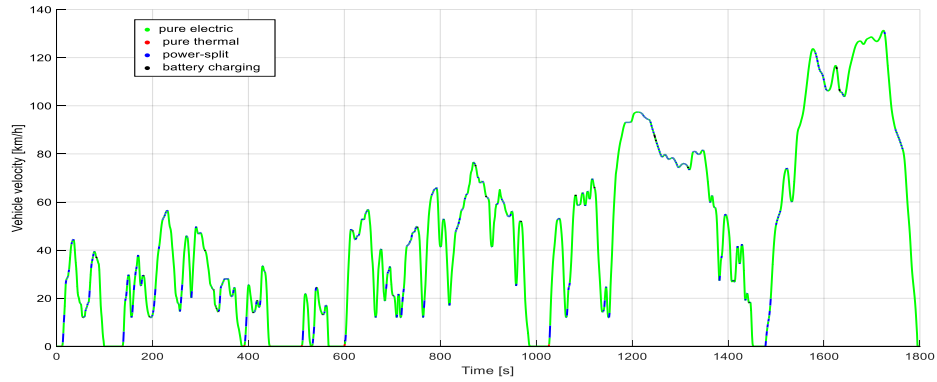


Figura 44: mappa WLTC a singola percorrenza PHEV p4 S.o.C 70%

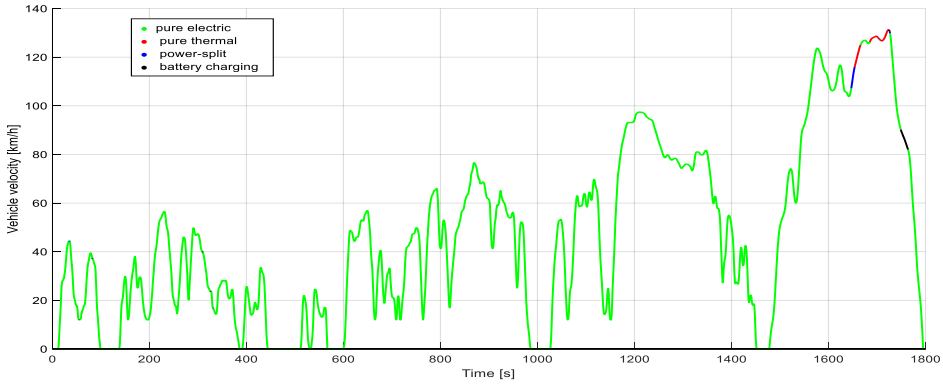


Figura 45: mappa WLTC a singola percorrenza PHEV p4 S.o.C 35%

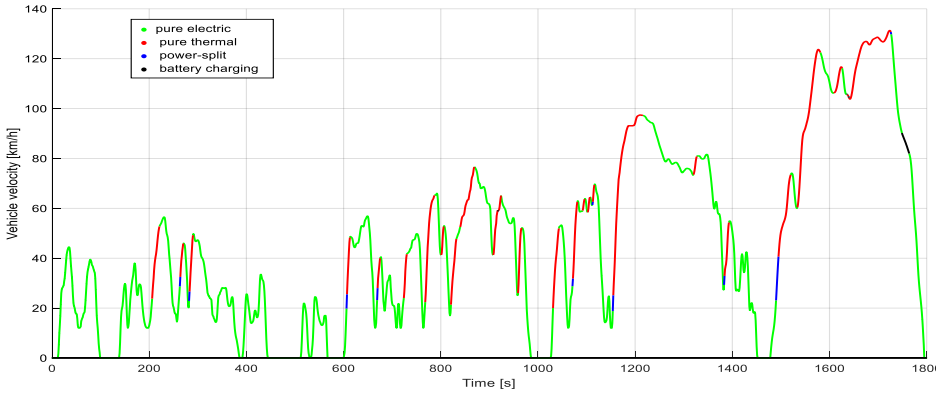


Figura 46: mappa WLTC a singola percorrenza PHEV p4 S.o.C 10%

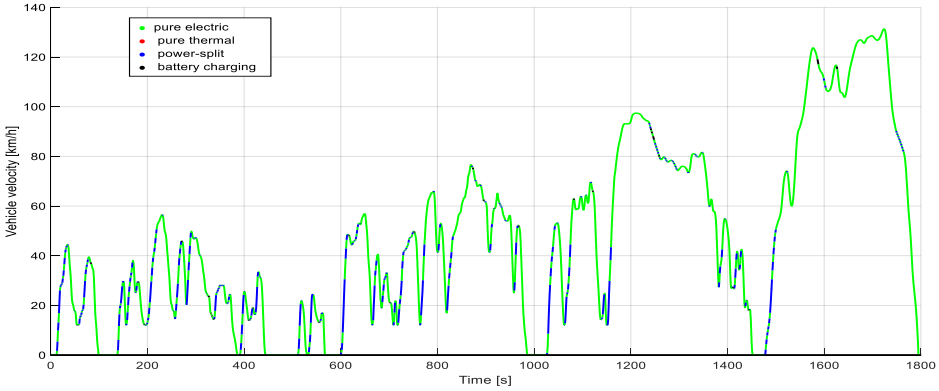


Figura 47: mappa WLTC a singola percorrenza PHEV p2p4 S.o.C 70%

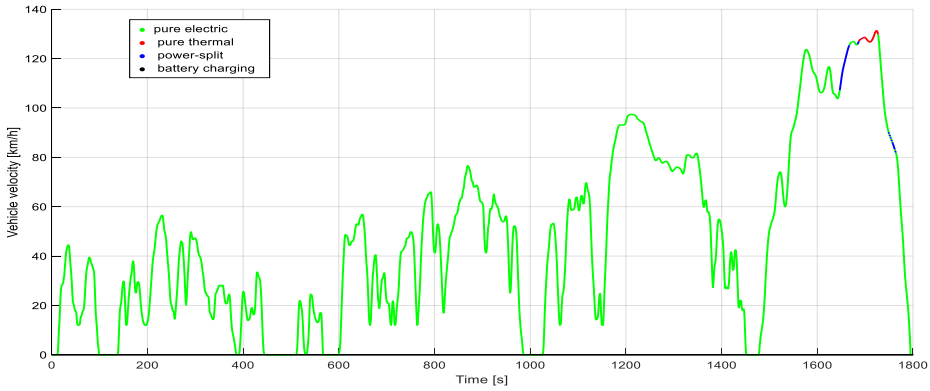


Figura 48: mappa WLTC a singola percorrenza PHEV p2p4 S.o.C 35%

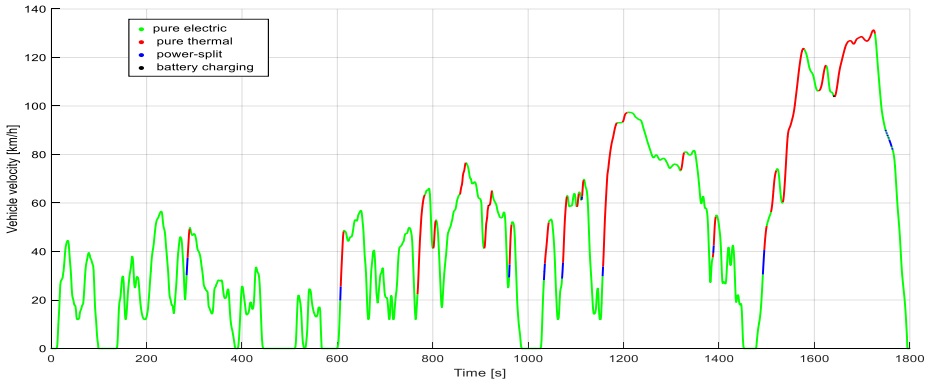


Figura 49: mappa WLTC a singola percorrenza PHEV p2p4 S.o.C 10%

8.3.2 Ciclo guida UEUC

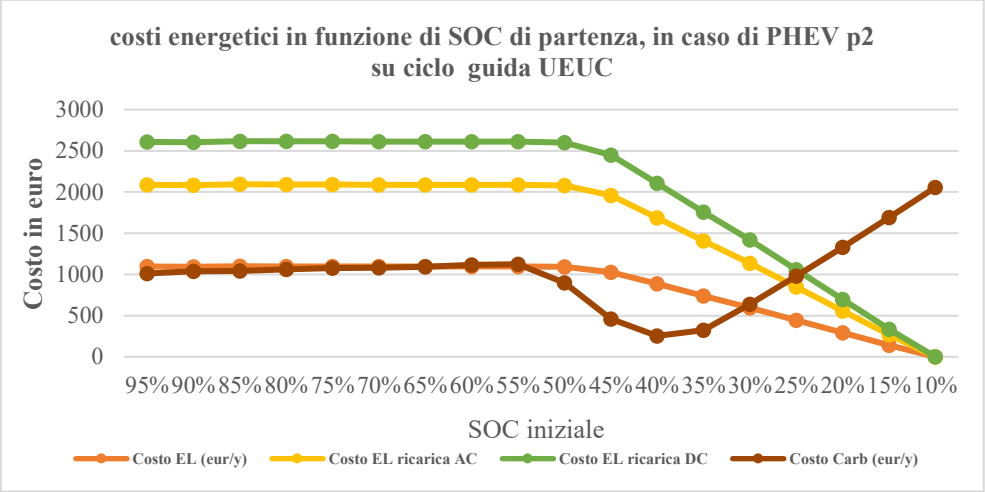


Figura 50: costi energetici in funzione di SOC di partenza, in caso di PHEV p2 su ciclo guida UEUC

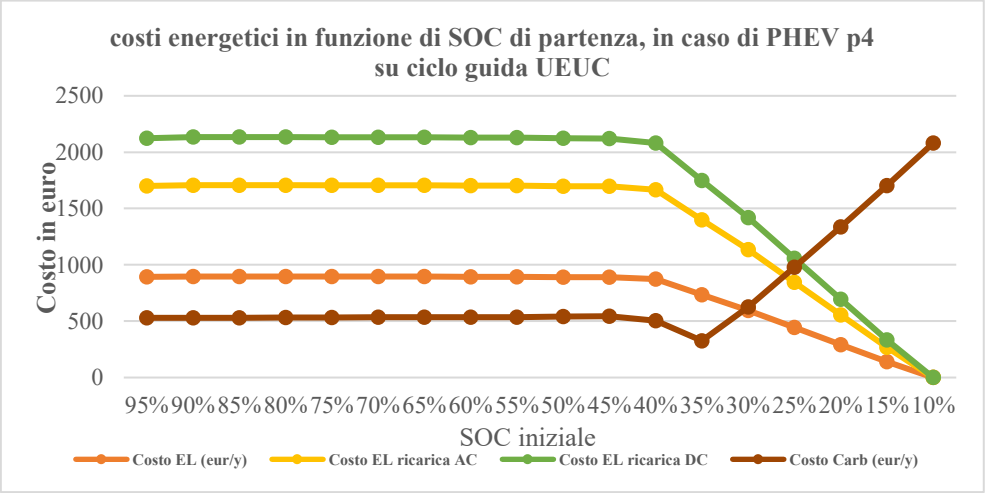


Figura 51: costi energetici in funzione di SOC di partenza, in caso di PHEV p4 su ciclo guida UEUC

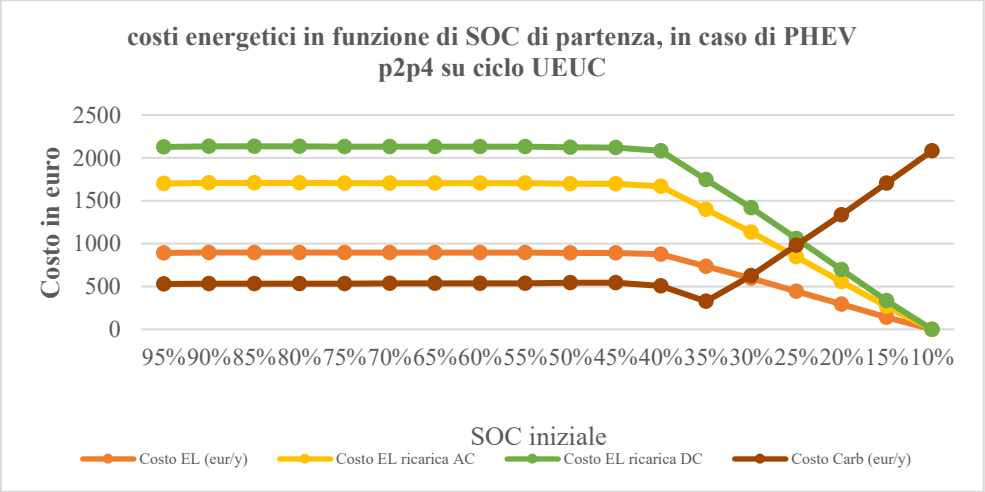


Figura 52: costi energetici in funzione di SOC di partenza, in caso di PHEV p2p4 su ciclo guida UEUC

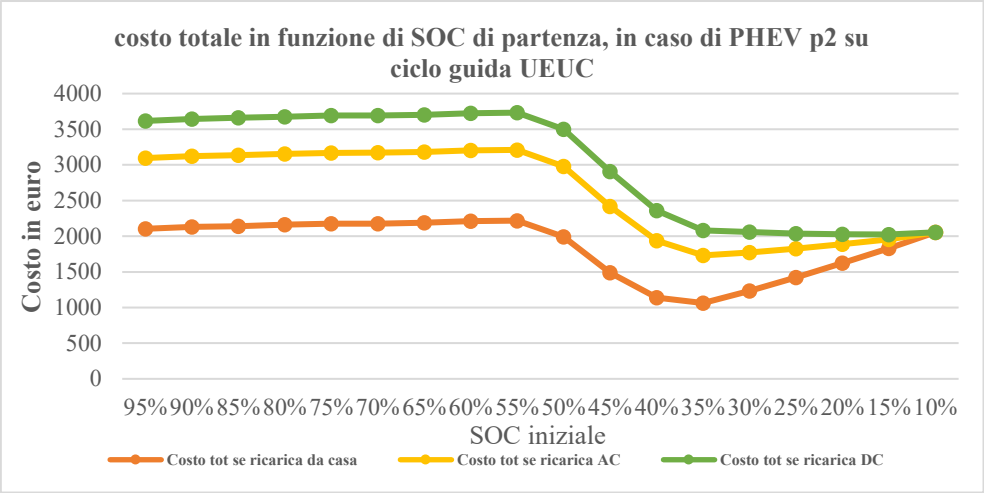


Figura 53: costo totale in funzione di SOC di partenza, in caso di PHEV p2 su ciclo guida UEUC

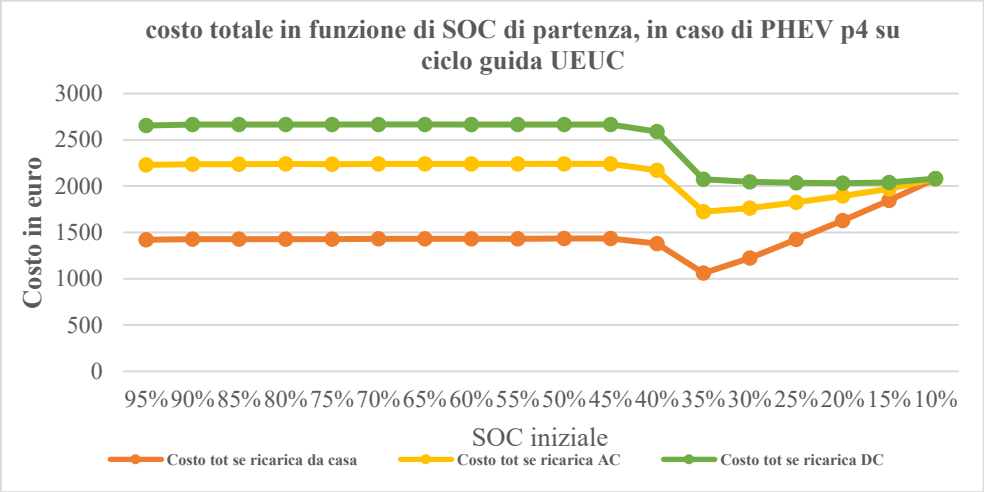


Figura 54: costo totale in funzione di SOC di partenza, in caso di PHEV p4 su ciclo guida UEUC

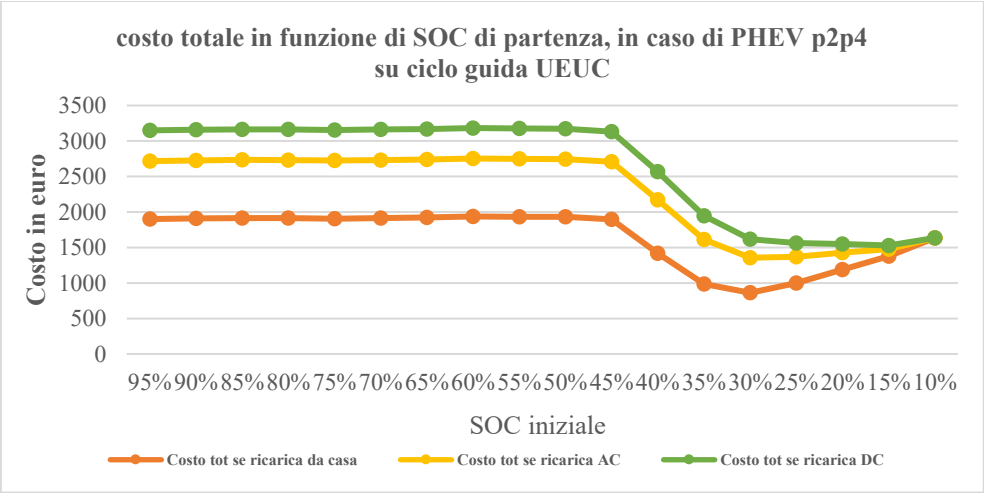


Figura 55: costo totale in funzione di SOC di partenza, in caso di PHEV p2p4 su ciclo guida UEUC

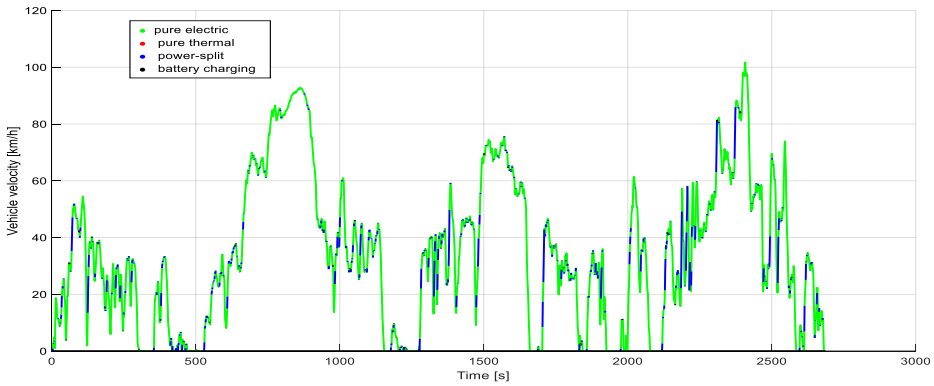


Figura 56: mappa UEUC PHEV p2 S.o.C 95%

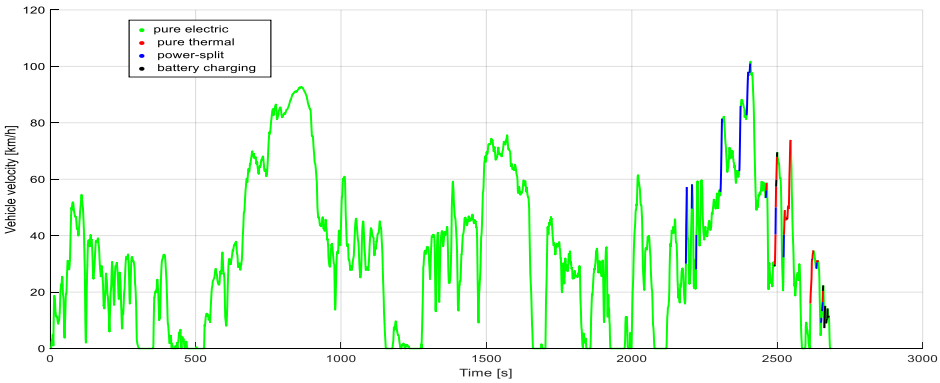


Figura 57: mappa UEUC PHEV p2 S.o.C 35%

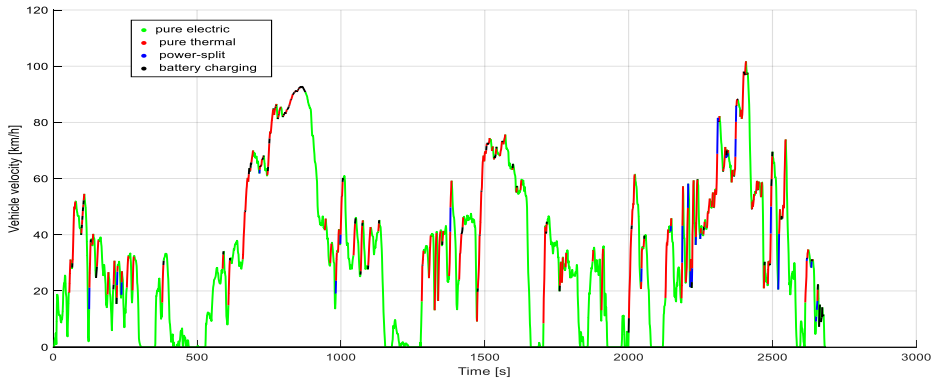


Figura 58: mappa UEUC PHEV p2 S.o.C 10%

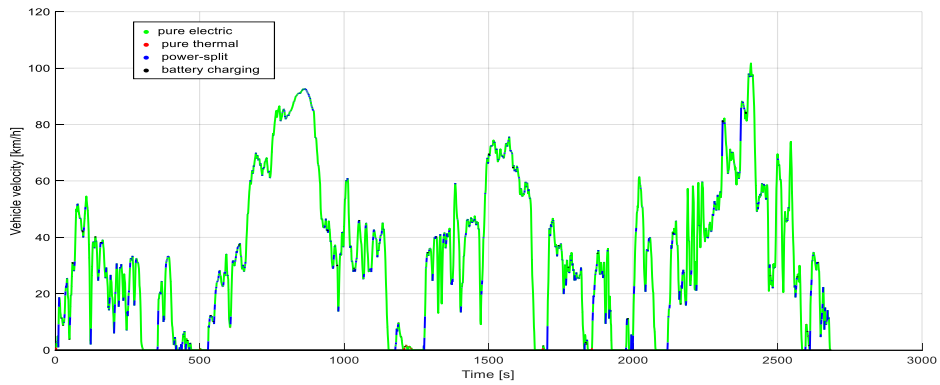


Figura 59: mappa UEUC PHEV p4 S.o.C 95%

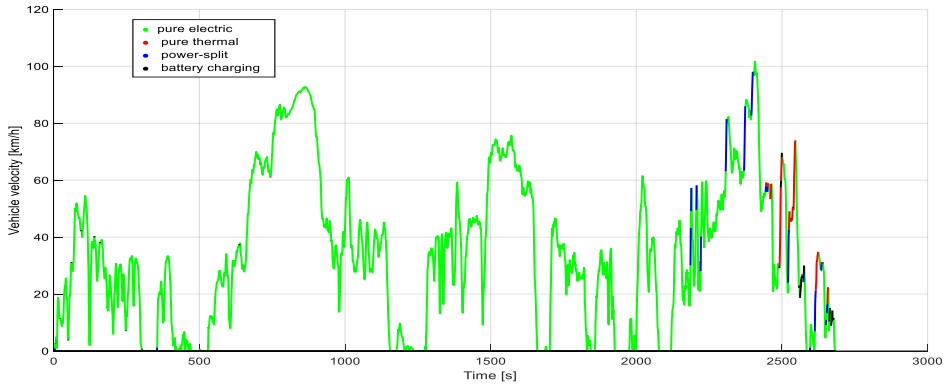


Figura 60: mappa UEUC PHEV p4 S.o.C 35%

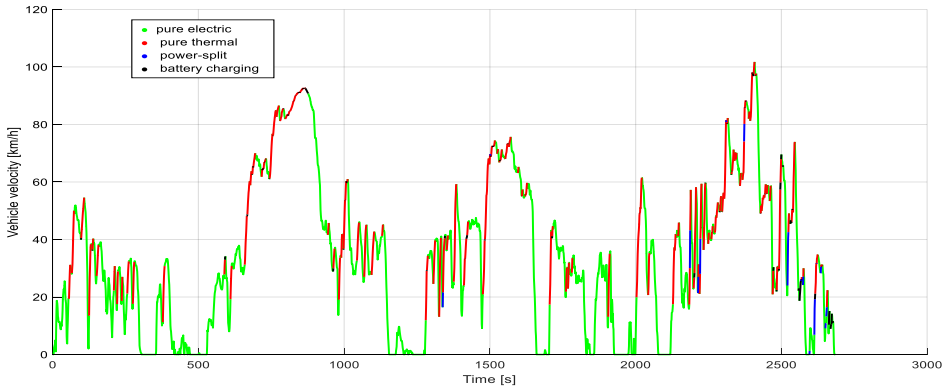


Figura 61: mappa UEUC PHEV p4 S.o.C 10%

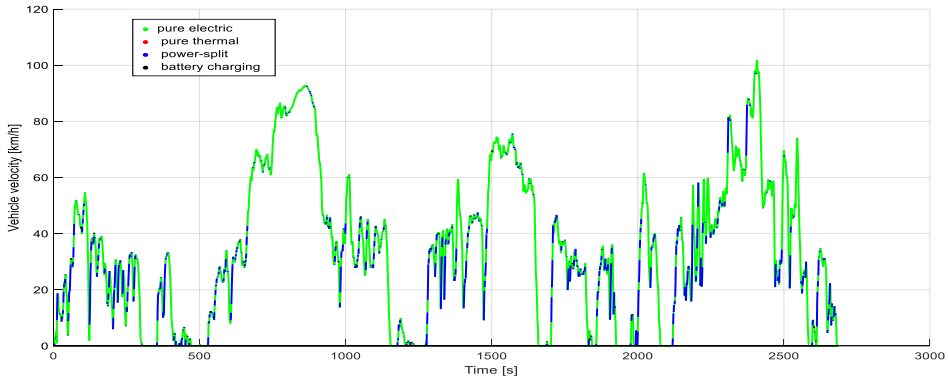


Figura 62: mappa UEUC PHEV p2p4 S.o.C 95%

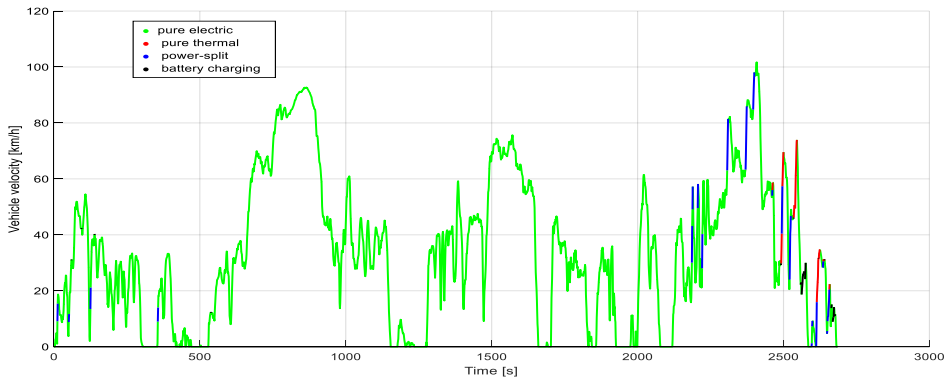


Figura 63: mappa UEUC PHEV p2p4 S.o.C 35%

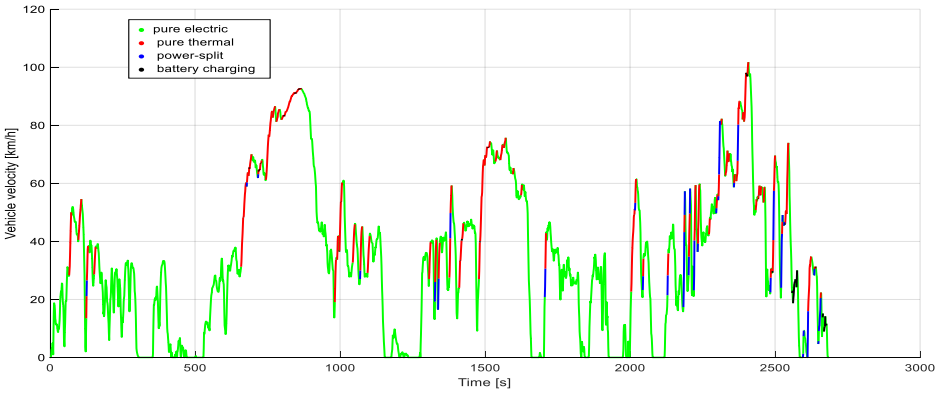


Figura 64: mappa UEUC PHEV p2p4 S.o.C 10%

8.3.3 Ciclo guida HIGHWAY

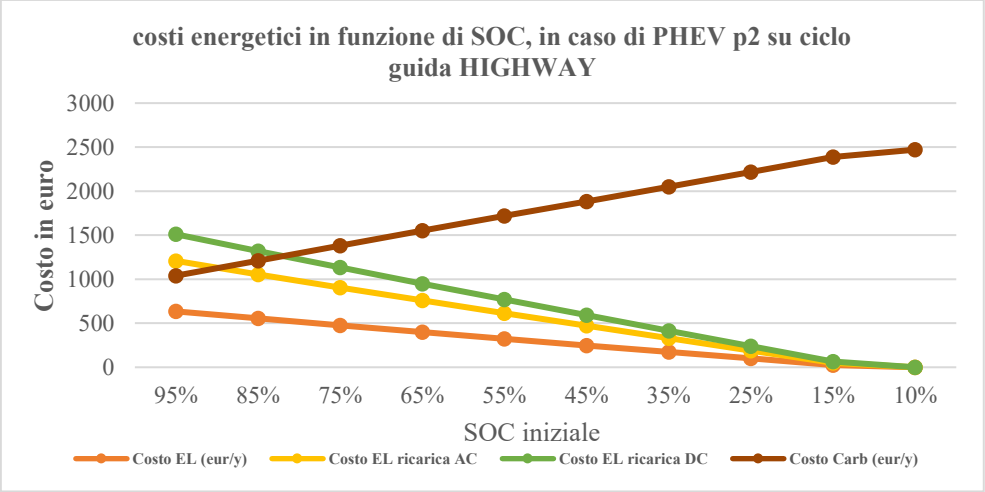


Figura 65: costi energetici in funzione di SOC, in caso di PHEV p2 su ciclo guida HIGHWAY

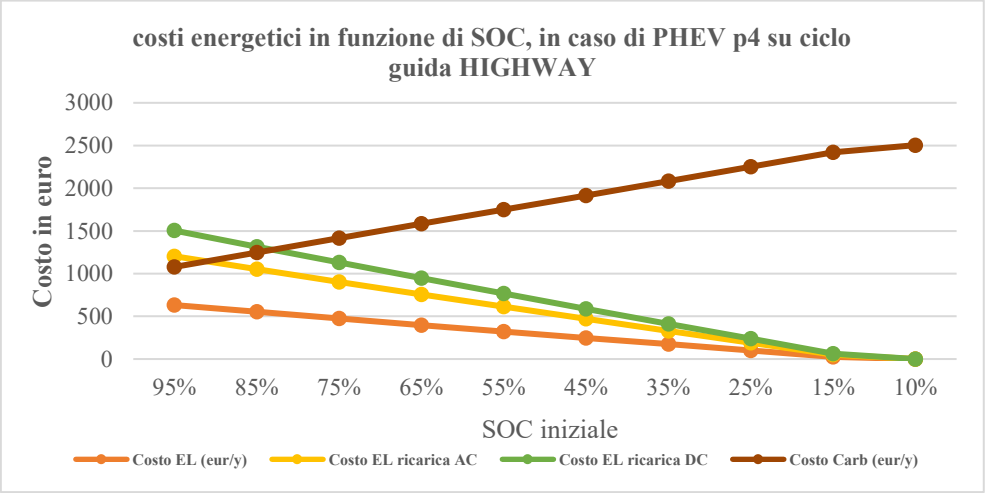


Figura 66: costi energetici in funzione di SOC, in caso di PHEV p4 su ciclo guida HIGHWAY

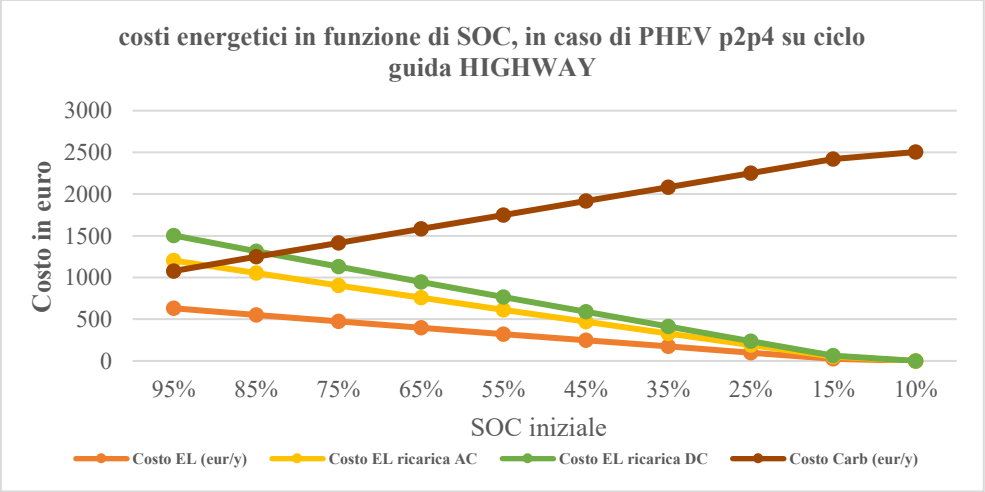


Figura 67: costi energetici in funzione di SOC, in caso di PHEV p2p4 su ciclo guida HIGHWAY

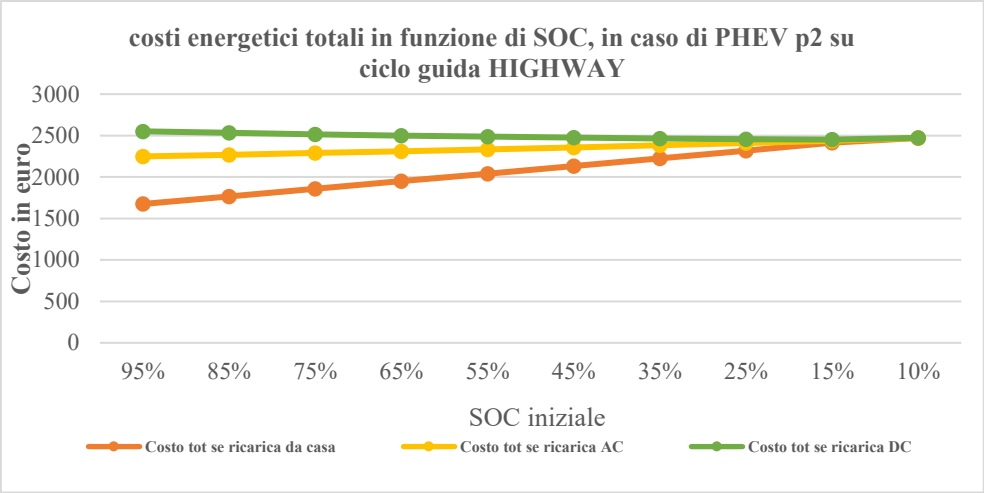


Figura 68: costi energetici totali in funzione di SOC, in caso di PHEV p2 su ciclo guida HIGHWAY

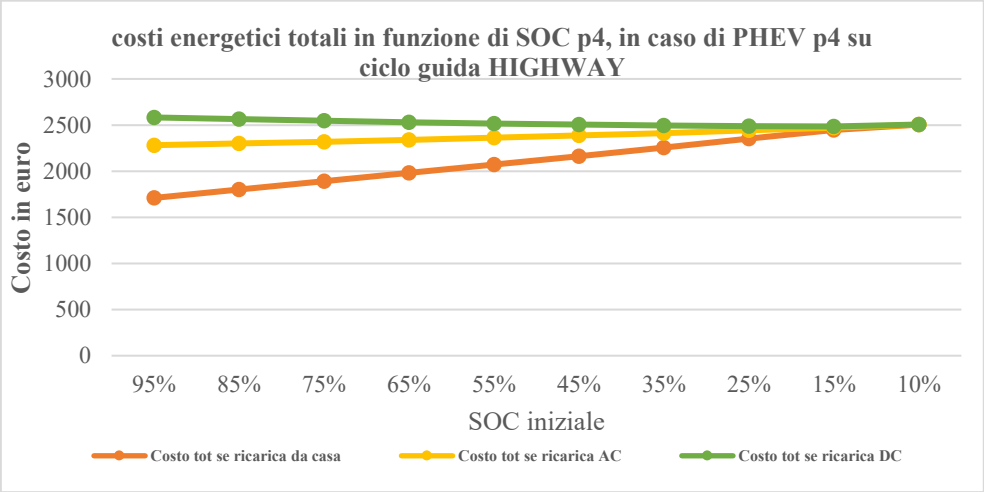


Figura 69: costi energetici totali in funzione di SOC, in caso di PHEV p4 su ciclo guida HIGHWAY

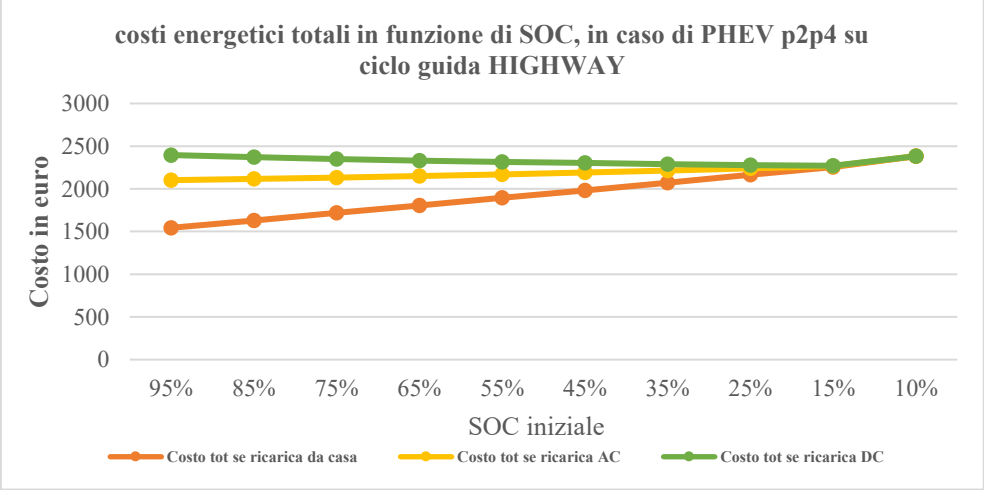


Figura 70: costi energetici totali in funzione di SOC, in caso di PHEV p2p4 su ciclo guida HIGHWAY

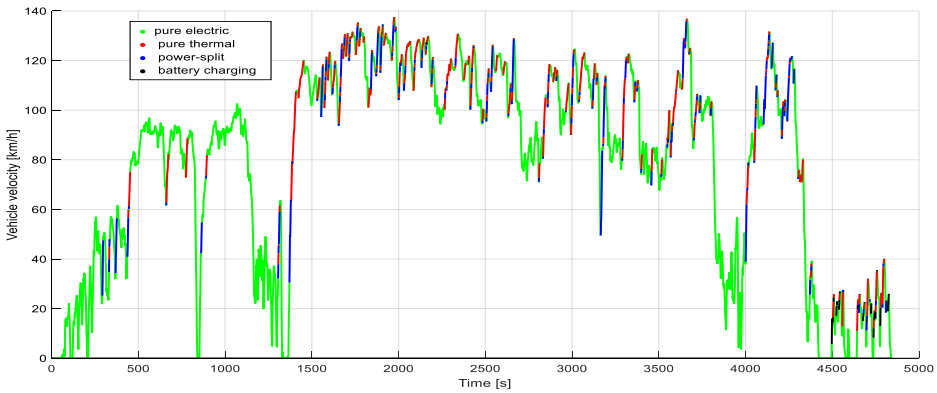


Figura 71: mappa HIGHWAY PHEV p2 S.o.C 70%

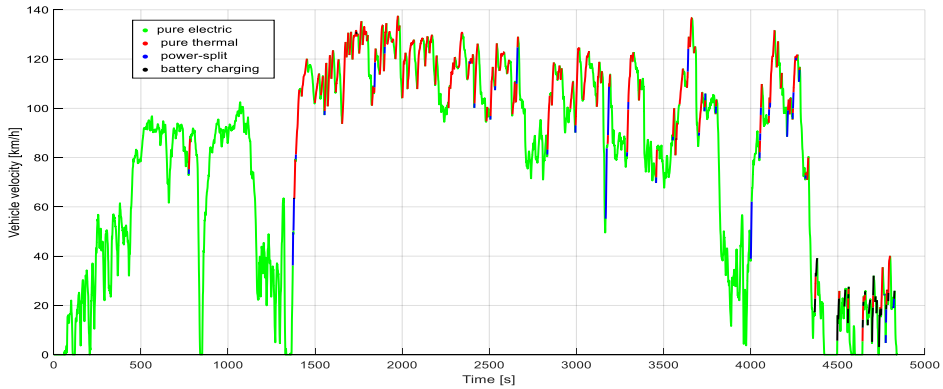


Figura 72: mappa HIGHWAY PHEV p4 S.o.C 70%

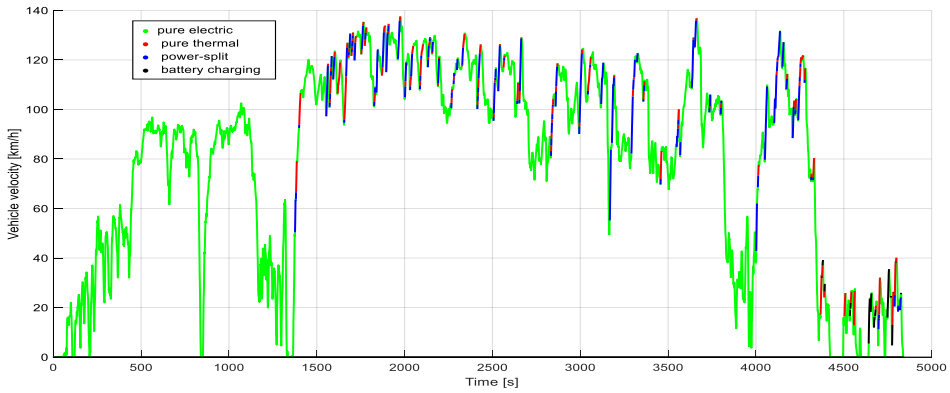


Figura 73: mappa HIGHWAY PHEV p2p4 S.o.C 70%

9. Confronto del costo totale annuale tra le architetture PHEV

I grafici raffiguranti le diverse modalità di percorrenza dei cicli guida per ogni architettura testata, da un lato evidenziano le similitudini esistenti tra i PHEVs in esame, dall'altro le loro differenze, che determinano notevoli diversità nei costi operativi annuali. Lo scopo di questo capitolo è quello di sottolineare tali differenze ed effettuare un confronto più serrato tra le tre architetture analizzate per comprendere se possa esserci una convenienza per l'acquirente dipendentemente dalla posizione del motore elettrico.

Il confronto sui costi energetici totali è realizzato considerando esclusivamente il caso di ricarica elettrica domestica. Questo è congruo con un veicolo PHEV in quanto la presenza di una batteria piccola è compensata dal motore endotermico e quindi, anche se scarica, il veicolo può funzionare come un full-hybrid l'utente non ha necessità di ricaricare il veicolo nell'immediato e quindi può evitare di ricorrere all'infrastruttura di ricarica pubblica.

Viene poi prospettato un indice di costo per cento chilometri che riassume al meglio le differenze tra le diverse motorizzazioni e le esemplifica in un unico termine economico. Per tener conto della variazione del costo energetico, per i PHEVs, al variare dello S.o.C. l'indice è valutato in quattro diversi range di carica della batteria, mediando aritmeticamente i costi ottenuti nei punti di interesse appartenenti a quell'intervallo di carica. Per meglio accentuare le differenze di costo operativo in relazione alle architetture PHEV esaminate, viene infine proposta una trasposizione grafica dell'indice, realizzata effettuando una media aritmetica, per ogni motorizzazione, dei costi per 100km calcolati precedentemente in funzione dello S.o.C. Si riportano le relazioni usate:

$$Costo_{intervallo\ i-esimo\ carica} = \frac{\sum Costo_{\ totale\ annuale}\ nei\ punti\ di\ interesse\ dell'intervallo}{100*\sum punti\ di\ interesse\ dell'intervallo}; \quad (5)$$

$$Costo_{medio} = \frac{\sum Costo_{intervallo\ i-esimo\ carica}}{N_{intervalli}}; \quad (6)$$

9.1 Confronto su WLTC a singola percorrenza

Riprendendo la suddivisione in intervalli di interesse discussa nel capitolo precedente, adattandola anche al confronto trai costi totali annuali delle architetture PHEVs sotto osservazione e in riferimento alle modalità di percorrenza del ciclo precedentemente riportate, si possono osservare marcate differenze nelle mappe motore in base all'architettura in esame e allo S.o.C iniziale con cui viene percorso il ciclo guida.

Nel primo intervallo l'architettura p4 si comporta in modo più efficiente rispetto alle altre e due. Questo è vero sia per quanto riguarda il motore elettrico, il quale lavora in punti globalmente con rendimento più alto, sia per quanto concerne il termico che è azionato, anche se a bassa efficienza, meno volte. La ragione è da ricercarsi nel fatto che nell'architettura p4 il collegamento tra il motore elettrico e le ruote è diretto grazie alla trazione integrale elettrica. Questo collegamento diretto è presente anche nell'architettura p2p4 ma la presenza dei due motori elettrici rende inevitabile che la potenza elettrica totale installata (uguale per tutte le tre architetture in questo lavoro di tesi) sia divisa tra le due macchine elettriche e, come tale, nell'architettura p2p4 il motore elettrico collegato direttamente alle ruote è più piccolo rispetto a quello di un equivalente veicolo p4.

Nel terzo intervallo, invece, i benefici di un'architettura ibrida complessa si fanno più evidenti. Questo perché con la batteria piuttosto scarica poter disporre di due motori elettrici collegati in modo indipendente consente dei netti benefici in termini di gestione dell'energia.

Le differenze tra le tre motorizzazioni si riflettono sia sulla *fuel consumption* (e quindi sulle emissioni di $CO_2 ttw$) sia sullo S.o.C finale della batteria dopo che il ciclo è stato percorso. Per quanto concerne il termine relativo alle emissioni di $CO_2 ttw$, ricavato dal software HEVBox, è importante osservare come, ogni architettura, per un ampio intervallo di livello di carica della batteria, sia sotto il limite previsto dalla normativa di 50 [g/km] di $CO_2 ttw$ emessa. È altresì vero che, anche quando il limite ZLEV non venga rispettato, un veicolo plug-in hybrid emetta $CO_2 ttw$ in modo molto minore rispetto ad un equivalente veicolo convenzionale.

Un termine da non sottovalutare, specialmente sulle brevi percorrenze quotidiane, è lo S.o.C finale della batteria dopo che il ciclo guida è stato percorso. Infatti, questo termine, disponibile anch'esso come output del software HEVBox, anche se non direttamente

quantificabile economicamente, è di fondamentale importanza per l'utente non solo in quanto dipendente dall'efficienza del motore elettrico installato e dal tipo di collegamento ma anche perché, avere una batteria più carica al termine di un percorso, posticipa il momento in cui effettuare la ricarica elettrica (che è sensibilmente più lunga rispetto alla ricarica del combustibile tradizionale) e ciò influisce positivamente sulla "*quality of life*" dell'utente. Sulla base di quanto detto è possibile osservare come in un veicolo p2 gli S.o.C finali siano di qualche punto percentuale più bassi rispetto alle altre due motorizzazioni.

In virtù dell'analisi fatta su questo ciclo guida emerge che l'architettura p4 sia preferibile in termini prettamente economici rispetto alle altre. Il costo medio per cento chilometri è strettamente più basso rispetto all'architettura p2 e leggermente più basso rispetto all'architettura p2p4. Il PHEV p4 inoltre è quello che su questo ciclo presenta gli S.o.C finali maggiori rispetto all'architettura p2 e confrontabili rispetto alla p2p4. Infine, in termini di emissioni (e quindi di *fuel consumption*) per un ampio intervallo di carica della batteria l'architettura p4 garantisce livelli minimi di $CO_2 ttw$, per quanto è l'architettura p2p4 che globalmente si mantiene sotto il limite ZLEV per la maggiorparte del range di S.o.C della batteria.

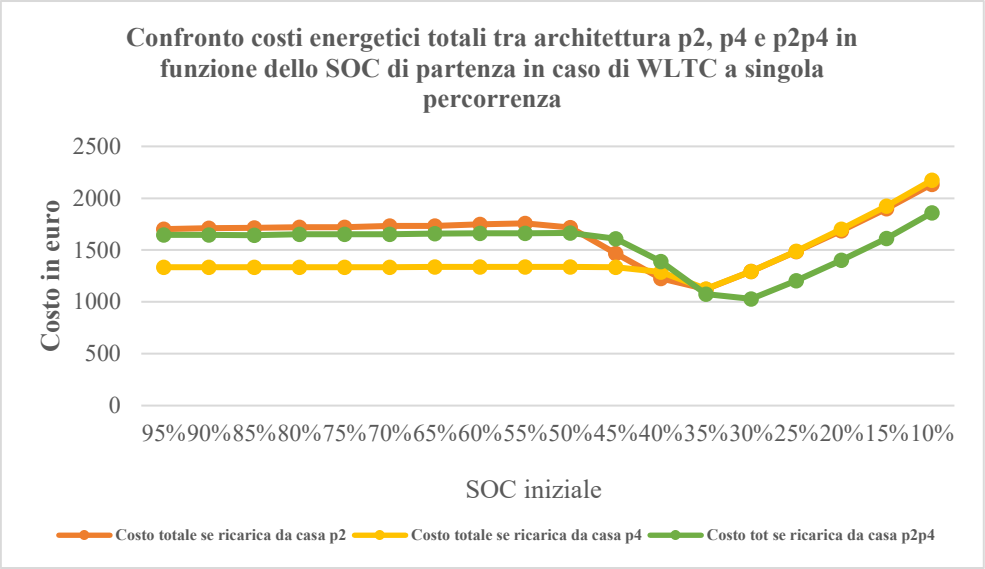


Figura 74: confronto costi energetici totali tra architettura p2, p4 e p2p4 in funzione dello SOC di partenza in caso di WLTC a singola percorrenza

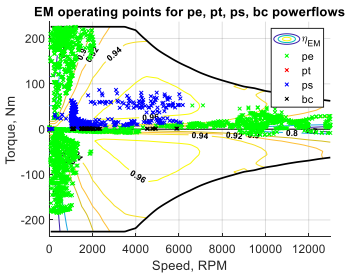


Figura 75: Mappa mot elettrico PHEV p2 S.o.C 95%

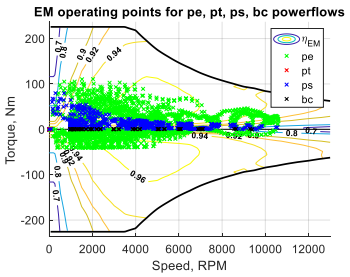


Figura 76: Mappa mot elettrico PHEV p4 S.o.C 95%

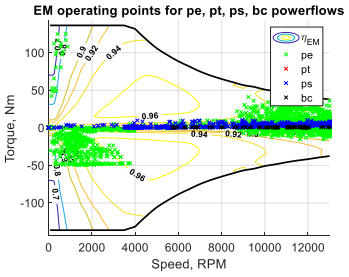


Figura 77: Mappa mot elettrico PHEV p2p4 S.o.C 95%

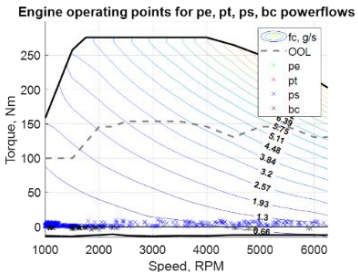


Figura 80: mappa mot termico PHEV p2 S.o.C 95%

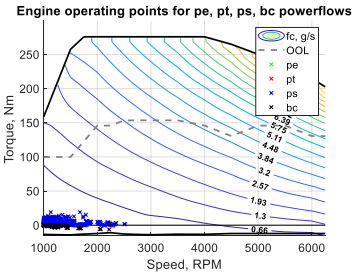


Figura 79: mappa mot termico PHEV p4 S.o.C 95%

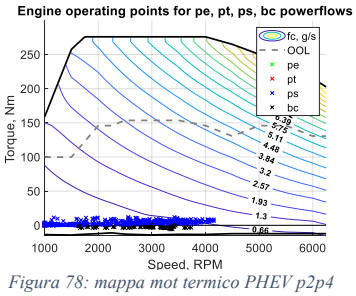


Figura 78: mappa mot termico PHEV p2p4 S.o.C 95%

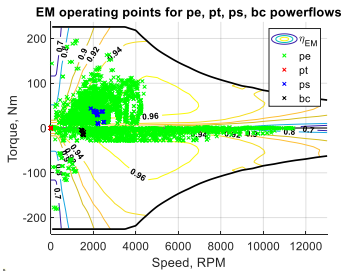


Figura 82: mappa mot elettrico PHEV p2 S.o.C 35%

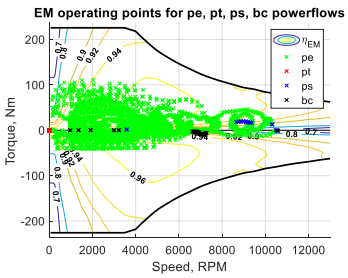


Figura 81 mappa mot elettrico PHEV p4 S.o.C 35%

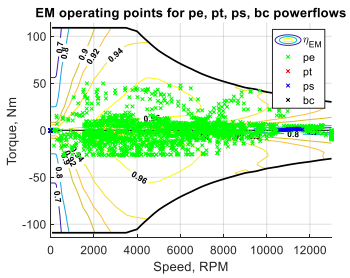


Figura 83: mappa mot elettrico PHEV p2p4 S.o.C 35%

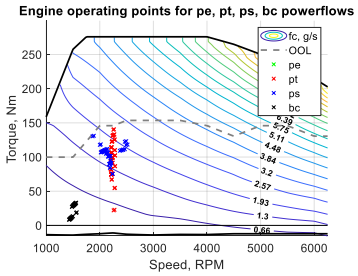


Figura 84: mappa mot termico PHEV p2 S.o.C 35%

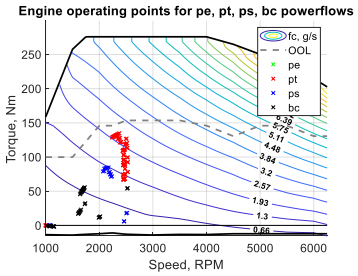


Figura 86: mappa mot termico PHEV p4 S.o.C 35%

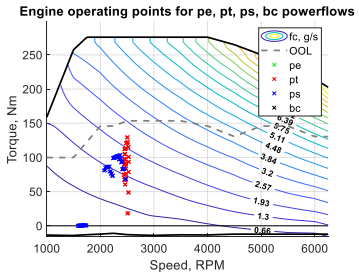


Figura 85: mappa mot termico PHEV p2p4 S.o.C 35%

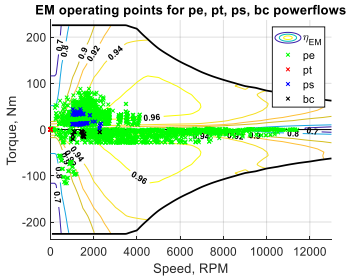


Figura 87: mappa mot elettrico PHEV p2 S.o.C 10%

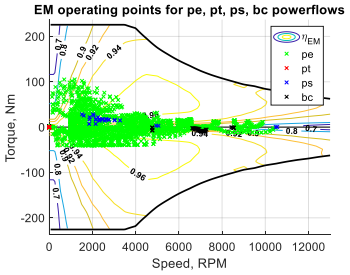


Figura 88: mappa mot elettrico PHEV p4 S.o.C 10%

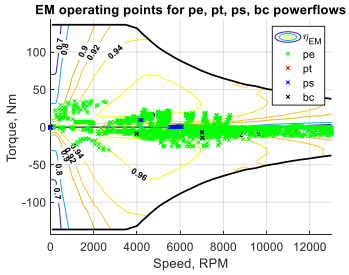


Figura 89: mappa mot elettrico PHEV p2p4 S.o.C 10%

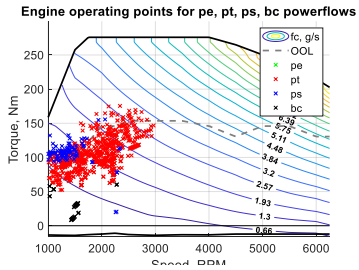


Figura 90: mappa mot termico PHEV p2 S.o.C 10%

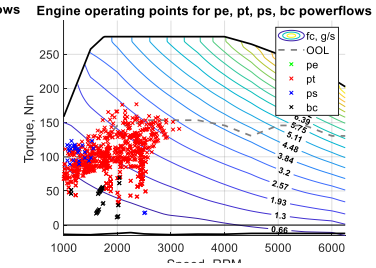


Figura 91: mappa mot termico PHEV p4 S.o.C 10%

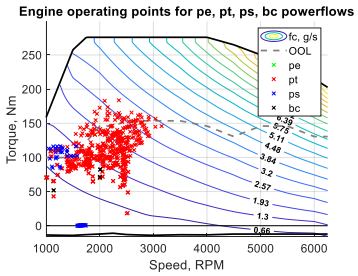


Figura 92: mappa mot termico PHEV p2p4 S.o.C 10%

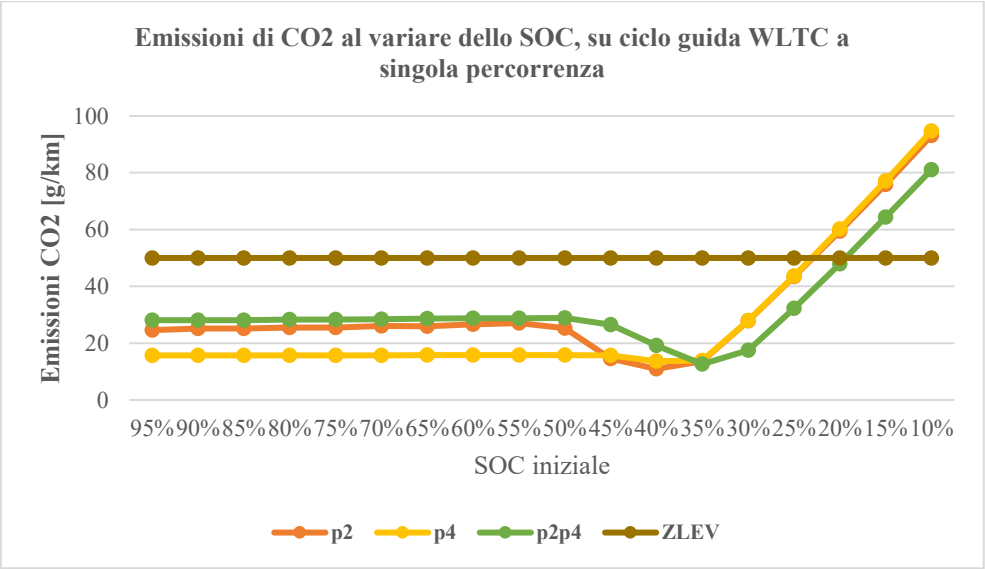


Figura 93: emissioni di CO2 al variare dello SOC, su ciclo guida WLTC a singola percorrenza

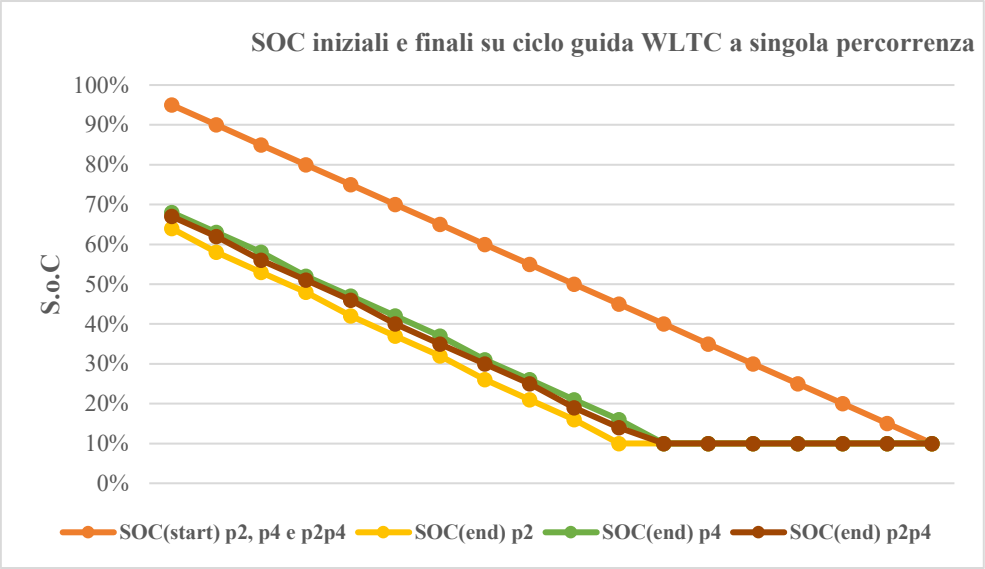


Figura 94: SOC iniziali e finali su ciclo guida WLTC a singola percorrenza

Tabella 18: Costo intervallo ricarica su ciclo WLTC a singola percorrenza

	P2 (From 95% to 65%)	P4 (From 95% to 65%)	P2P4 (From 95% to 65%)	
WLTC	5,21	4,04	5,00	*[Euro/100km]*
	P2 (From 65% to 35%)	P4 (From 65% to 35%)	P2P4 (From 65% to 35%)	
WLTC	4,66	3,94	4,64	*[Euro/100km]*
	P2 (From 35% to 10%)	P4 (From 35% to 10%)	P2P4 (From 35% to 10%)	
WLTC	4,86	4,90	4,13	*[Euro/100km]*
	P2 (10%)	P4 (10%)	P2P4 (10%)	
WLTC	6,47	6,59	5,63	*[Euro/100km]*

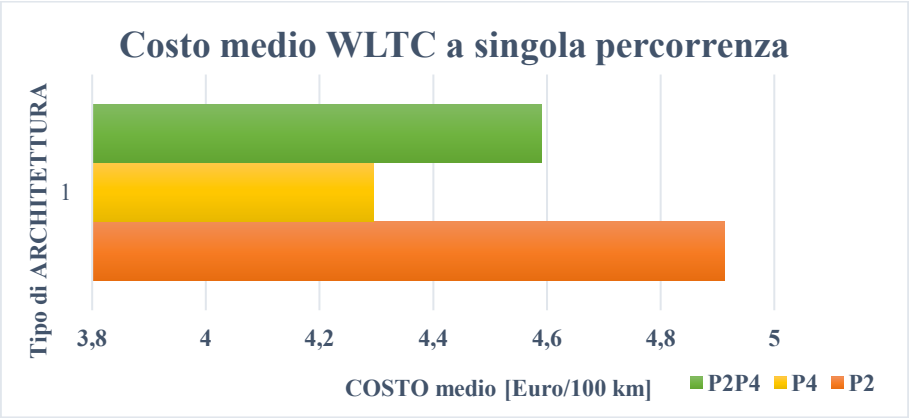


Figura 95: Costo medio su WLTC a singola percorrenza

9.2 Confronto su UEUC

Quanto osservato precedentemente sul ciclo WLTC a singola percorrenza è estendibile anche al ciclo UEUC. Si evidenzia una netta convenienza dell'architettura p4 rispetto alle altre due nel primo intervallo di S.o.C (95%-55%) dovuto all'esclusività della trazione elettrica integrale. Nel terzo range di S.o.C invece è l'architettura complessa ad essere la preferibile. Per quanto concerne l'indice di costo medio per cento chilometri, anche in questo caso è l'architettura p2 ad averne il valore più alto, seguita dalla p2p4.

Anche su questo ciclo guida le emissioni di $CO_2 ttw$ si mantengono ad un livello inferiore al limite ZLEV per un ampio intervallo di S.o.C., tuttavia è importante sottolineare come, seppur inferiori al limite di 50 *[g/km]* nel range di S.o.C compreso tra 95% e 35% le emissioni ascrivibili alle architetture p2 e p2p4 sono nettamente superiori rispetto a quelle di cui è responsabile l'architettura p4.

Non si registra invece un netto gap negli S.o.C finali per le architetture p4 e p2p4, per quanto entrambi sono sempre superiori rispetto a quelli relativi all'architettura p2.

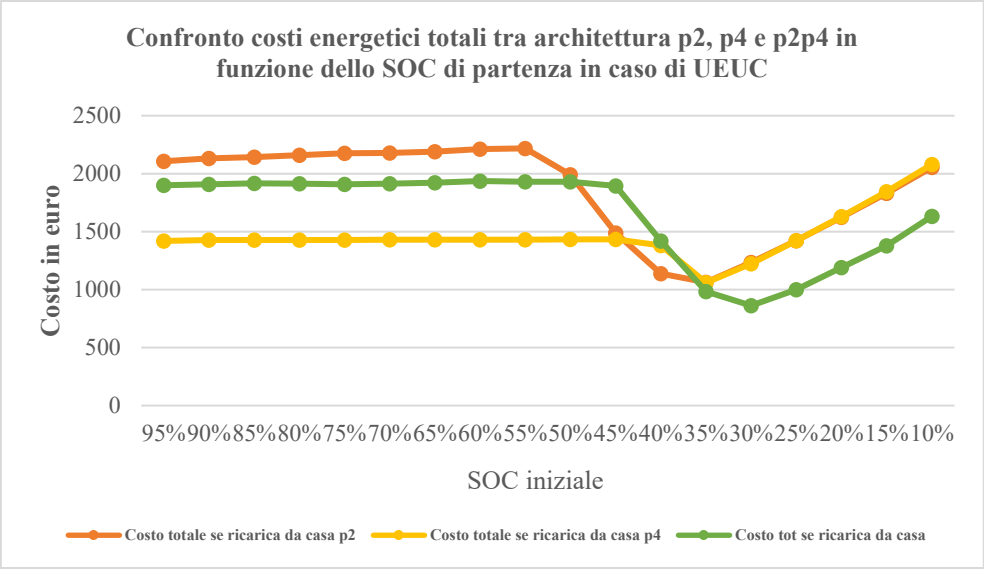


Figura 96: confronto costi energetici totali tra architettura p2, p4 e p2p4 in funzione dello SOC di partenza in caso di ciclo UEUC

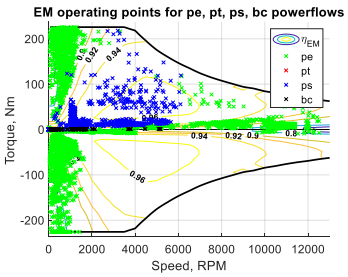


Figura 99: Mappa mot elettrico PHEV p2 S.o.C 95%

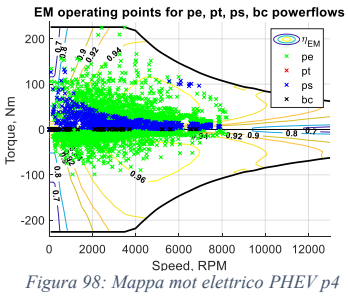


Figura 98: Mappa mot elettrico PHEV p4 S.o.C 95%

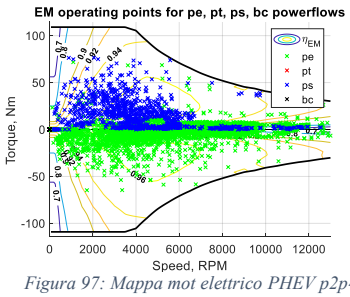


Figura 97: Mappa mot elettrico PHEV p2p4 S.o.C 95%

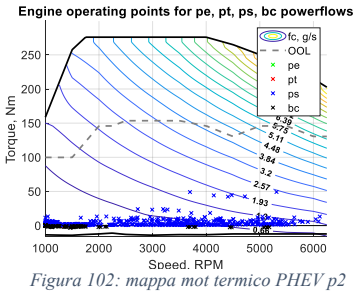


Figura 102: mappa mot termico PHEV p2 S.o.C 95%

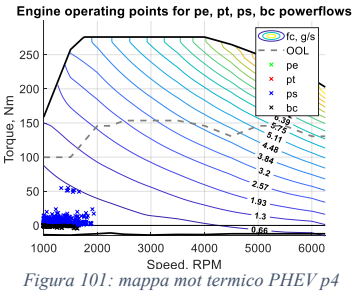


Figura 101: mappa mot termico PHEV p4 S.o.C 95%

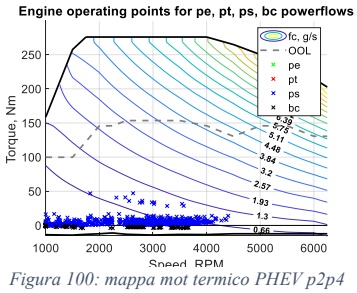


Figura 100: mappa mot termico PHEV p2p4 S.o.C 95%

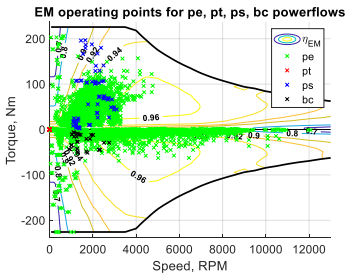


Figura 103: mappa mot elettrico PHEV p2 S.o.C 35%

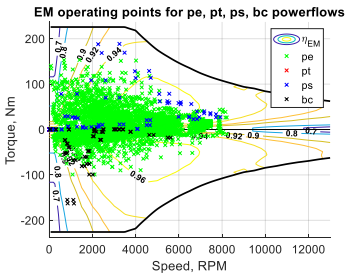


Figura 104: mappa mot elettrico PHEV p4 S.o.C 35%

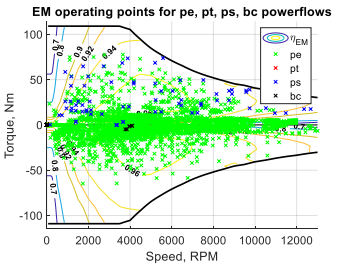


Figura 105: mappa mot elettrico PHEV p2p4 S.o.C 35%

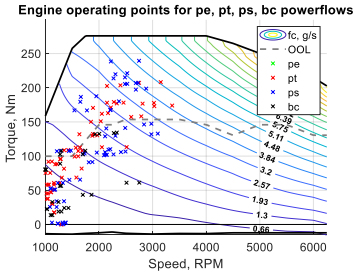


Figura 106: mappa mot termico PHEV p2 S.o.C 35%

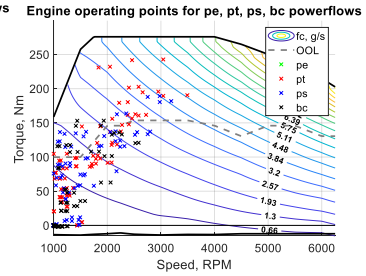


Figura 107: mappa mot termico PHEV p4 S.o.C 35%

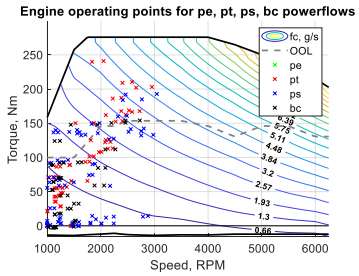


Figura 108: mappa mot termico PHEV p2p4 S.o.C 35%

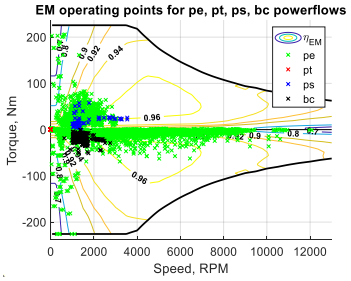


Figura 111: mappa mot elettrico PHEV p2 S.o.C 10%

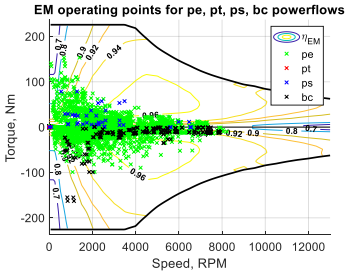


Figura 110: mappa mot elettrico PHEV p4 S.o.C 10%

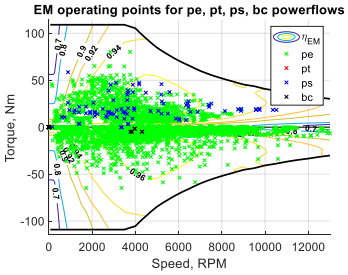


Figura 109: mappa mot elettrico PHEV p2p4 S.o.C 10%

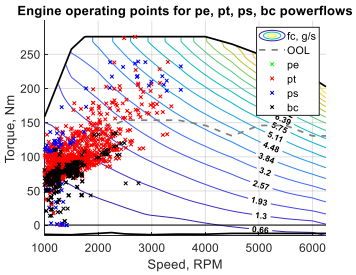


Figura 114: mappa mot termico PHEV p2 S.o.C 10%

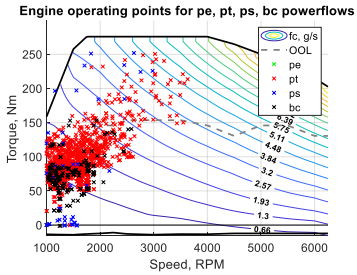


Figura 113: mappa mot termico PHEV p4 S.o.C 10%

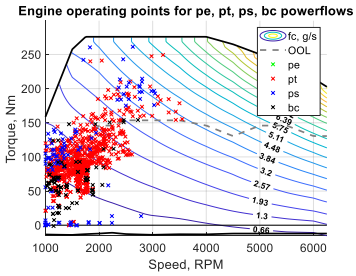


Figura 112: mappa mot termico PHEV p2p4 S.o.C 10%

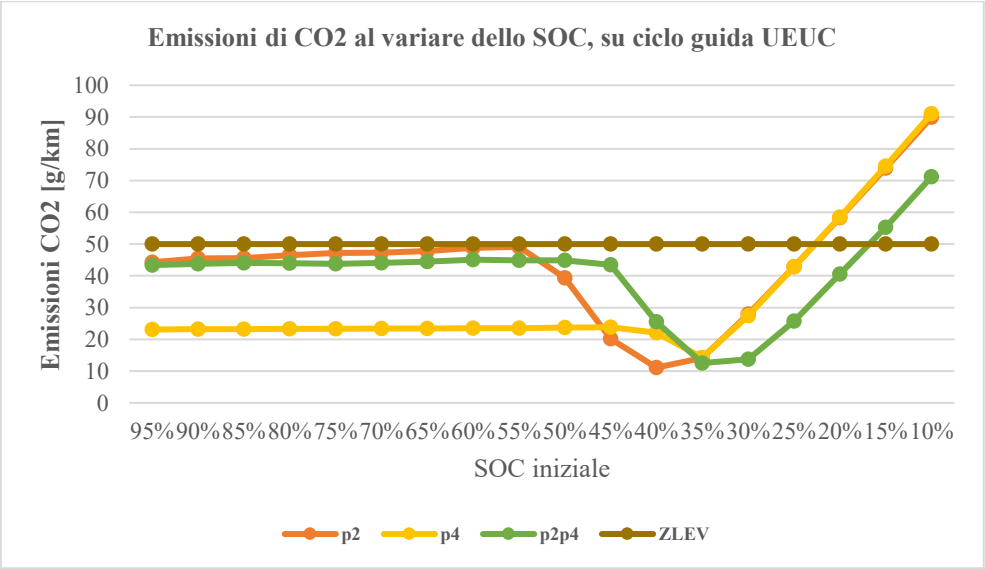


Figura 115: emissioni di CO2 al variare dello SOC, su ciclo guida UEUC

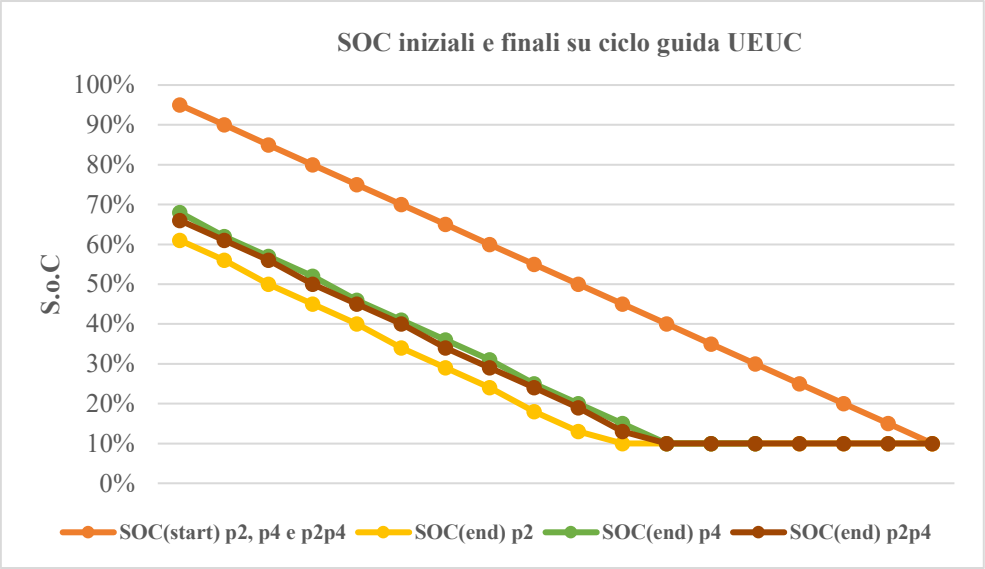


Figura 116: SOC iniziali e finali su ciclo guida UEUC

Tabella 19: Costo intervallo ricarica su ciclo UEUC

	P2 (From 95% to 65%)	P4 (From 95% to 65%)	P2P4 (From 95% to 65%)	
UEUC	6,53	4,32	5,79	*[Euro/100km]*
	P2 (From 65% to 35%)	P4 (From 65% to 35%)	P2P4 (From 65% to 35%)	
UEUC	5,33	4,16	5,20	*[Euro/100km]*
	P2 (From 35% to 10%)	P4 (From 35% to 10%)	P2P4 (From 35% to 10%)	
UEUC	4,66	4,68	3,56	*[Euro/100km]*
	P2 (10%)	P4 (10%)	P2P4 (10%)	
UEUC	6,23	6,30	4,95	*[Euro/100km]*

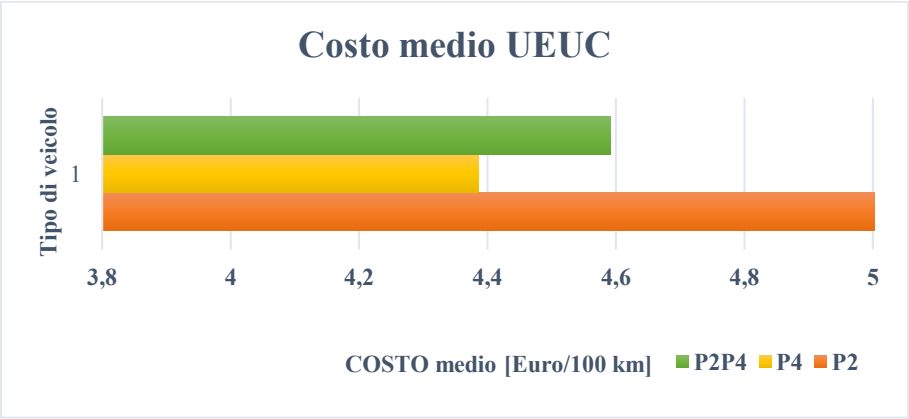


Figura 117: Costo medio su UEUC

9.3 Confronto su HIGHWAY

Sul ciclo autostradale HIGHWAY le tre architetture PHEVs si comportano in modo piuttosto simile in quanto si osserva un andamento linearmente crescente dei costi energetici totali al ridursi dello S.o.C totale. Tuttavia, in termini di valore assoluto del costo energetico annuale, è l'architettura complessa, questa volta, ad essere la più conveniente e a presentare, quindi, un valore di costo medio per cento chilometri più basso.

In riferimento alle mappe motore per un caso rappresentativo di S.o.C e alle modalità di percorrenza del ciclo, è possibile osservare come il motore termico dell'architettura p2p4 funzioni principalmente con modalità "power-split" nell'intorno della OOL, diversamente dalle due architetture semplici che utilizzano più frequentemente la modalità "puro-termico". Inoltre, sono minori nel PHEV complesso le fasi di "battery-charging" che sono molto dispendiose dal punto di vista energetico. Per questa migliore gestione dell'energia, su questo tipo di ciclo, il PHEV p2p4 si comporta in modo migliore.

A livello di emissioni, sfortunatamente, nessun PHEV rispetta i limiti previsti per i ZLEV. Questo è certamente dovuto al fatto che il ciclo percorso è molto più aggressivo rispetto al ciclo WLTC utilizzato per la procedura normativa; tuttavia, questi livelli di emissioni possono aprire, per le architetture ibride plug-in, un problema di sostenibilità ambientale. È tuttavia importate ricordare come questo tipo di veicoli emettano molto meno rispetto un equivalente veicolo convenzionale se testato nelle stesse condizioni.

Il costo medio per cento chilometri è ovviamente più alto rispetto a quanto osservato nei due cicli precedenti per l'architettura p2 di circa il 22%, per la p4 di circa il 50% e per la p2p4 di circa il 25%.

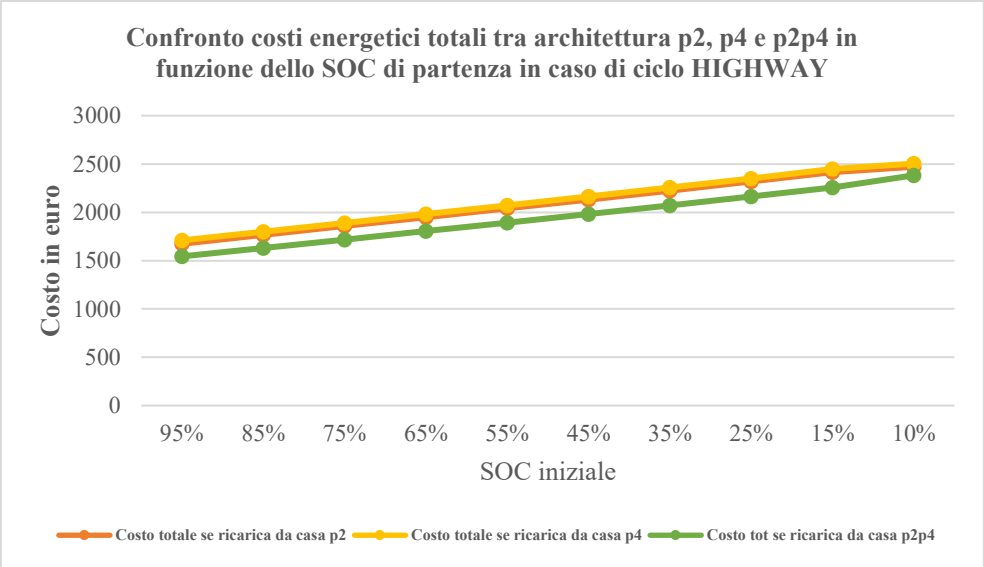


Figura 118: confronto costi energetici totali tra architettura p2, p4 e p2p4 in funzione dello SOC di partenza in caso di ciclo HIGHWAY

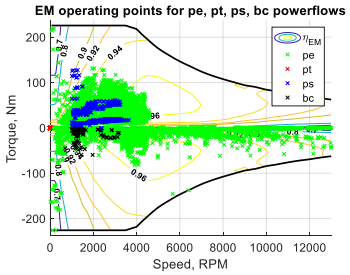


Figura 121: mappa mot elettrico PHEV p2 S.o.C 70%

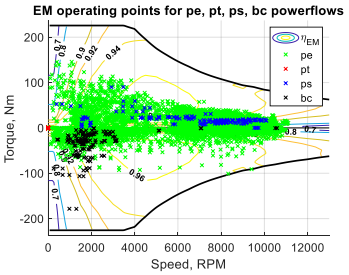


Figura 120: mappa mot elettrico PHEV p4 S.o.C 70%

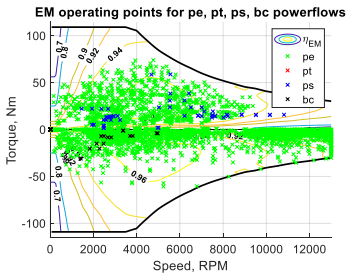


Figura 119: mappa mot elettrico PHEV p2p4 S.o.C 70%

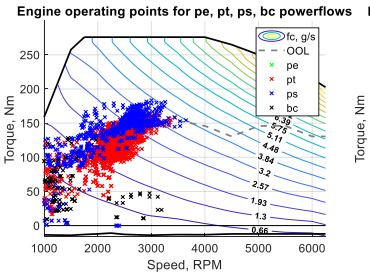


Figura 124: mappa mot termico PHEV p2 S.o.C 70%

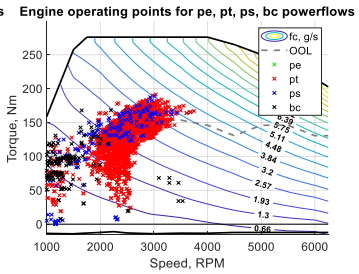


Figura 123: mappa mot termico PHEV p4 S.o.C 70%

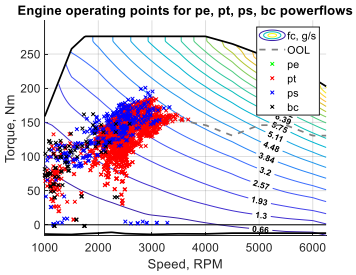


Figura 122: mappa mot termico PHEV p2p4 S.o.C 70%

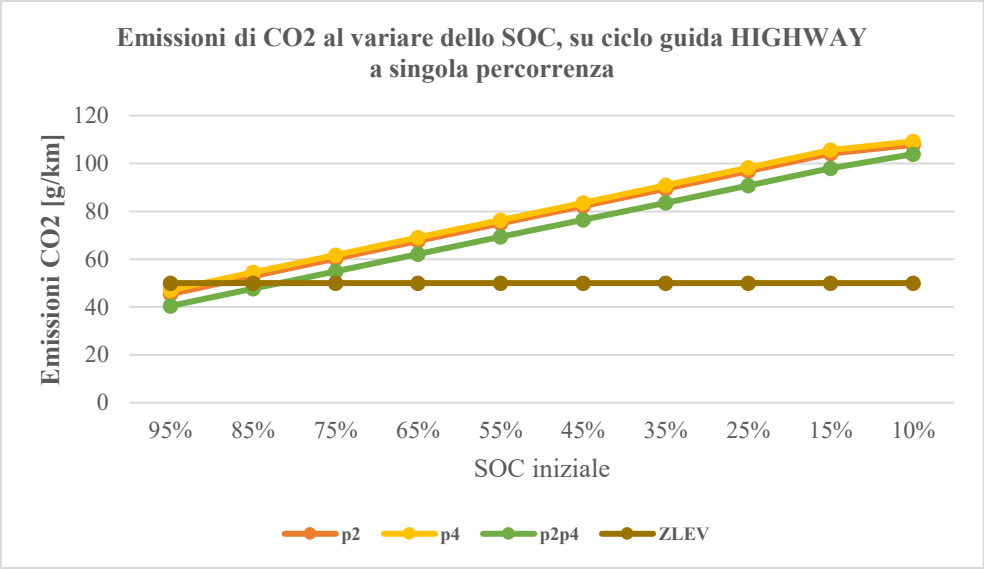


Figura 125: emissioni di CO2 al variare dello SOC, su ciclo guida HIGHWAY a singola percorrenza

Tabella 20: Costo intervallo ricarica su ciclo HIGHWAY

	P2 (From 95% to 10%)	P4 (From 95% to 10%)	P2P4 (From 95% to 10%)	
HIGHWAY	6,32	6,42	5,89	[Euro/100km]

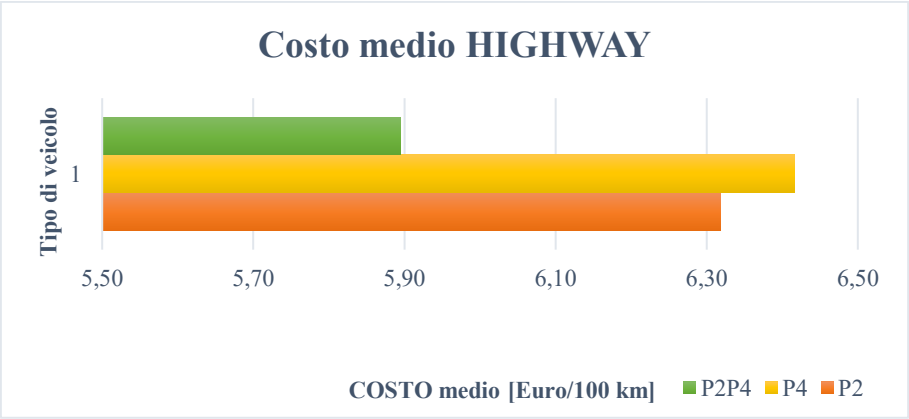


Figura 126: Costo medio su HIGHWAY

10. Break even point della ricarica elettrica su PHEV p4

Occorre, prima di effettuare un confronto dei costi operativi tra le architetture PHEVs e i veicoli puramente elettrici, interrogarsi più approfonditamente sulla convenienza della ricarica elettrica rispetto al combustibile tradizionale, in un veicolo ibrido plug-in. Infatti, se da un lato si è visto come a parità di veicolo, il PHEV più conveniente sia il p4, dall'altro, non è ancora chiaro quanto il costo della ricarica elettrica influisca sul costo totale. A tal proposito, i grafici precedentemente riportati nei capitoli 8 e 9, mostrano chiaramente l'influenza del prezzo dell'energia elettrica sul costo energetico annuo, tanto che, talvolta, è preferibile lavorare con la batteria completamente scarica (in questo caso il PHEV lavora praticamente come un full hybrid) piuttosto che con la batteria completamente carica.

Sulla base di questo, lo scopo di questo capitolo è la determinazione del "break even point" del costo della ricarica elettrica su ciclo urbano/extraurbano.

Il costo della ricarica elettrica, infatti, non varia solo sulla base della potenza ma anche sulla base del mix energetico con cui è ottenuta, costi dell'infrastruttura di rete, tasse, se è di importazione o no e da tanti altri fattori. Si riporta in seguito (figura 128) un grafico raffigurante i costi dell'energia elettrica al *[kWh]* nei diversi paesi europei.

Per determinare il punto di pareggio della ricarica elettrica, per il PHEV p4, è quindi sufficiente confrontare il costo energetico totale annuo quando il veicolo funziona con la batteria al minimo (10%), con il costo energetico totale annuo se il veicolo lavora con la batteria al 95%, facendo variare il costo della ricarica elettrica in un intervallo compreso tra 0,05*[euro/kWh]* e 0,55*[euro/kWh].* Ovviamente il termine di costo influenzato dal prezzo della ricarica elettrica è il secondo, in quanto l'energia elettrica che il PHEV ha disponibile quanto la batteria è completamente scarica deriva dall'energia recuperata in frenata e quella resa disponibile dal motore termico in "battery-charging".

I risultati dello studio sono disponibili nel grafico riportato in seguito (figura 127) e mostrano come il punto di pareggio della ricarica elettrica per questo veicolo, su questo ciclo guida, sia intorno a 0,37*[euro/kWh].* Dunque, per poter risparmiare significativamente l'utente deve effettuare la ricarica elettrica esclusivamente privatamente (a casa o in azienda) e non tramite la ricarica pubblica, il cui costo minimo, in Italia, è di 0,4*[euro/kWh].*

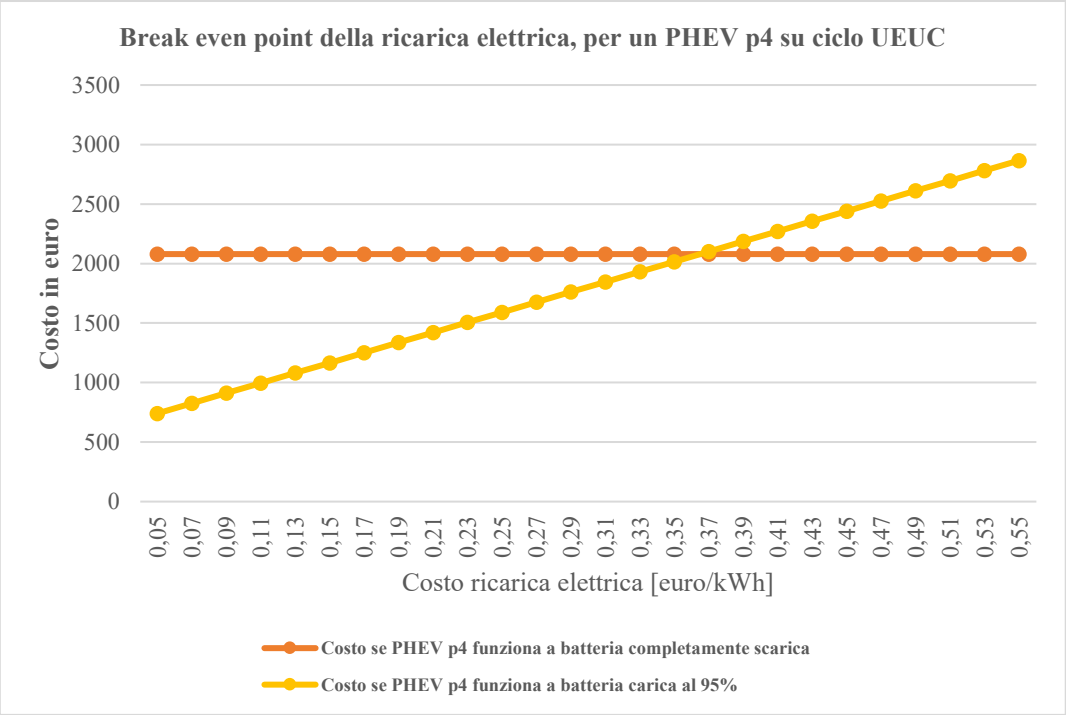


Figura 127: Break even point della ricarica elettrica, per un PHEV p4 su ciclo UEUC

	Country	Cost per kWh
1	Ukraine	€0.05
2	Kosovo	€0.06
3	Serbia	€0.07
4	North Macedonia	€0.08
5	Bosnia and Herz	€0.09
6	Turkey	€0.10
7	Bulgaria	€0.10
8	Hungary	€0.10
9	Moldova	€0.11
10	Estonia	€0.12
11	Malta	€0.13
12	Croatia	€0.13
13	Iceland	€0.13
14	Norway	€0.14
15	Latvia	€0.14
16	Lithuania	€0.14
17	Netherlands	€0.14
18	Slovenia	€0.14
19	Romania	€0.15
20	Poland	€0.15
21	Greece	€0.17
22	Slovakia	€0.17
23	Finland	€0.17
24	Sweden	€0.18
25	Czechia	€0.18
26	France	€0.19
27	Luxembourg	€0.20
28	Austria	€0.21
29	Liechtenstein	€0.21
30	Portugal	€0.21
31	Cyprus	€0.21
32	United Kingdom	€0.22
33	Italy	€0.22
34	Spain	€0.22
35	Ireland	€0.24
36	Belgium	€0.28
37	Denmark	€0.28
38	Germany	€0.30

https://switcher.ie/car-insurance/cost-of-charging-electric-car-e

Figura 128: costi dell'energia elettrica al kWh nei diversi paesi europei

11. Confronto economico trai PHEVs ed i BEVs

Lo scopo di questo capitolo è quello di effettuare un confronto tra le diverse architetture PHEVs esaminate in precedenza, un veicolo convenzionale ICE equivalente e alcune tipologie di BEVs disponibili attualmente sul mercato. Per poter effettuare questa analisi è prima necessario delineare degli scenari di guida medi che possono adattarsi alle abitudini di diversi guidatori. A questo fine è di grande ispirazione il report *"il futuro della mobilità elettrica: l'infrastruttura di ricarica in Italia @2030, [Ottobre 2020] [24]"* redatto da *Motus-E*, il quale ritrae quattro profili di potenziali utenti di auto elettriche e ne descrive sommariamente le abitudini di guida. Traendo spunto da questi quattro profili e, avendo a disposizione un ciclo urbano/extraurbano (UEUC) e un ciclo autostradale (HIGHWAY), si sono ideati altrettanti scenari di guida annuali. La simulazione di tratte più lunghe è realizzata facendo percorrere più di una volta lo stesso ciclo sia che si tratti di un percorso urbano/extraurbano sia autostradale.

11.1 Primo scenario di guida medio.

Il primo scenario di guida si riferisce ad un utente privato medio, il cui stile di guida è prevalentemente urbano ed extraurbano ma che saltuariamente effettui tragitti in autostrada. Un tipo di guida di questo tipo potrebbe riferirsi ad un utente che viva in una zona residenziale nei pressi o appena fuori dalla città e che utilizzi l'auto quotidianamente per raggiungere il posto lavoro e spesso nel fine settimana per tratte fuori porta o per raggiungere il centro città. In questo scenario si è prevista una percorrenza annuale di poco meno di 14000 *[km]* che è in linea con questo tipo di profilo.

Si considerano comunque 20 giorni di auto ferma che possono comprendere giorni festivi, eventuali operazioni di manutenzione del veicolo, giorni in cui l'auto non è utilizzata ecc.

Tabella 21: distribuzione scenario guida 1

38 settimane guida UEUC
52 giorni guida UEUC ma più lunga (2 volte il ciclo)
13 giorni HIGHWAY
13 giorni HIGHWAY ma più lungo (2 volte il ciclo)
20 giorni auto ferma

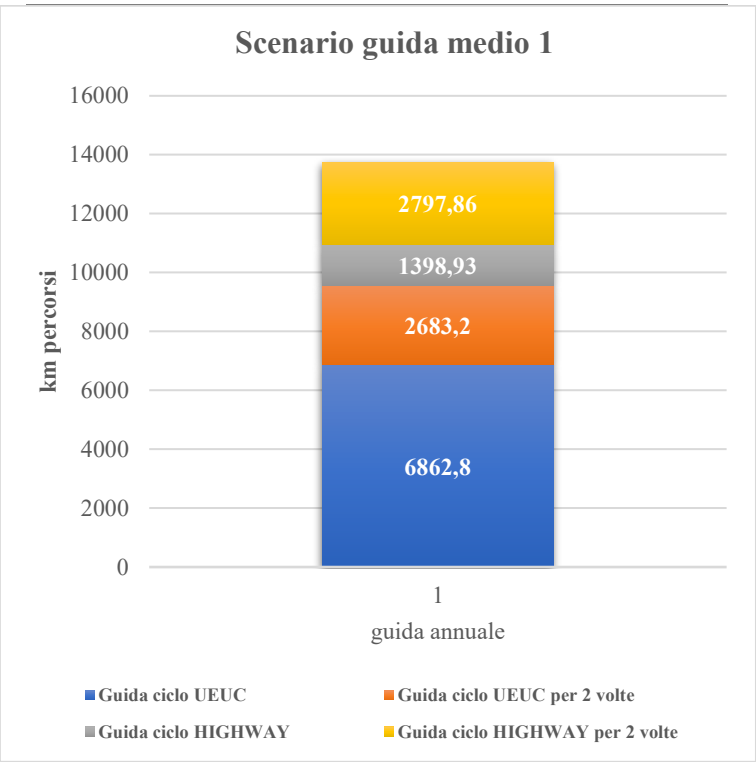


Figura 129: scenario guida uno

11.2 Secondo scenario di guida medio

Nel il secondo scenario si è considerato ancora un utente privato medio questa volta però con una percorrenza annuale maggiore. In questo caso si è supposto un utente che per ragioni private o lavorative utilizzi l'auto per tragitti più lunghi. A differenza del primo scenario si è considerato il tratto UEUC percorso per distanze maggiori e si è supposto un maggior utilizzo dell'autostrada. Anche in questo caso si è scelto di mantenere i venti giorni di auto ferma per le stesse ragioni riportate in precedenza. Con queste ipotesi la percorrenza annuale risulta appena superiore a 20000 *[km]*.

Tabella 22: distribuzione scenario guida 2

20 settimane guida UEUC
25 settimane guida UEUC ma più lunga (2 volte il ciclo)
24 giorni HIGHWAY
25 giorni HIGHWAY ma più lungo (2 volte il ciclo)
20 giorni auto ferma

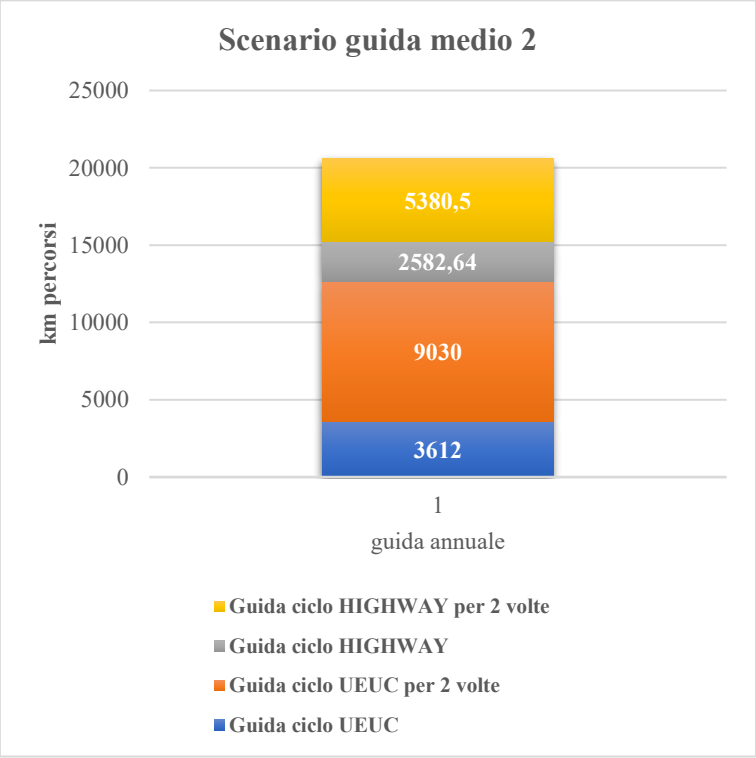


Figura 130: scenario di guida due

11.3 Terzo scenario di guida medio

In questo scenario si guarda ad un utente con guida prettamente urbana/extraurbana. Si è supposto che l'utente in questione abiti in centro città ed utilizzi il veicolo per raggiungere il lavoro a sua volta in città o nelle immediate vicinanze. Vengono comunque presi in considerazione dei tragitti in autostrada eccezionali, i giorni di veicolo fermo e quindi la percorrenza annuale risulta inferiore ai 10000 *[km]*.

Tabella 23: distribuzione scenario guida 3

48 settimane guida UEUC
20 giorni auto ferma
8 giorni HIGHWAY

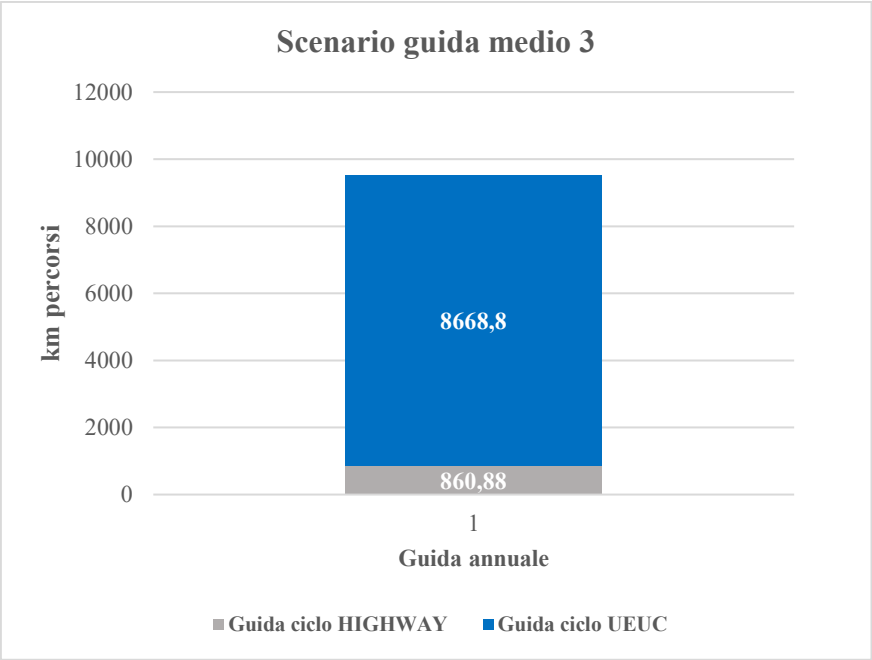


Figura 131: scenario di guida tre

11.4 Quarto scenario di guida medio

In quest'ultimo scenario di guida si prende come riferimento un utente aziendale. In questo caso l'auto è utilizzata per ragioni lavorative e l'utilizzo non necessariamente è da attribuirsi ad un unico utente. I tragitti sono più mediamente più lunghi se comparati a quelli di altri scenari e comprendono sia tratti UEUC (mediamente più lunghi) sia tratti in autostrada (che sono più lunghi e frequenti rispetto agli altri scenari di guida).

Rimanendo coerenti con l'ipotesi di auto aziendale si sono considerate sia due settimane in cui l'azienda è chiusa sia le domeniche in cui l'auto rimane parcheggiata. La percorrenza annuale è di poco più di 25000 *[km]*.

Tabella 24: distribuzione scenario di guida 4

156 giorni guida UEUC più lunga (2 volte il ciclo)
52 giorni HIGHWAY
52 giorni HIGHWAY più lungo (2 volte il ciclo)
46 domeniche annuali auto ferma
14 giorni ferie
44 giorni guida UEUC

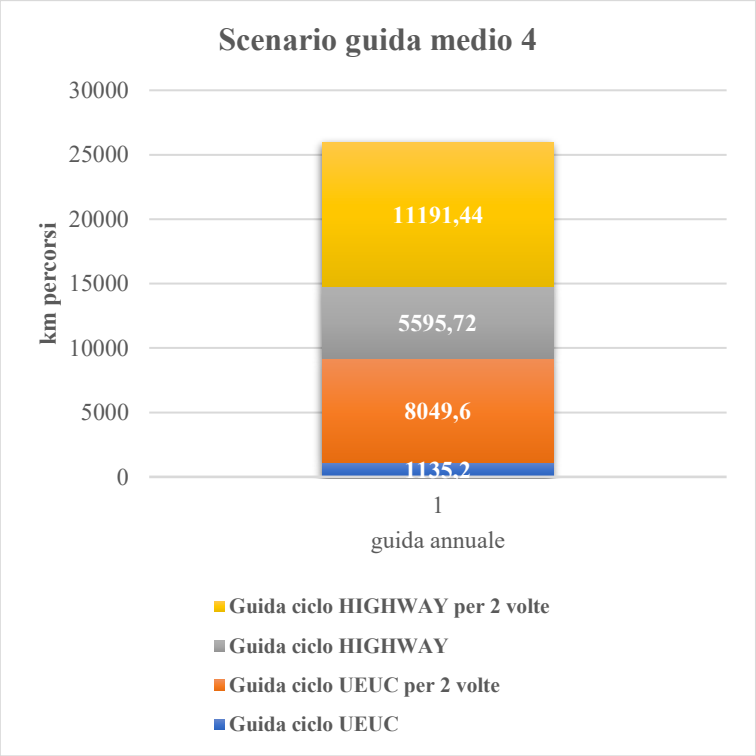


Figura 132: scenario di guida quattro

11.5 Confronto tra i costi energetici annuali in caso di ricarica elettrica domestica

Avendo definito gli scenari medi di guida su cui confrontare i veicoli, al fine di effettuare il calcolo, si riportano, in tabella 25 i dati relativi alla capacità della batteria e al consumo di alcuni BEVs. I dati sono presi dai siti ufficiali dei produttori e, come tali, non sono derivanti software sperimentale HEVbox. Tali dati relativi al consumo sono quindi da intendersi come indicativi e non rappresentano l'effettivo consumo del veicolo sui cicli guida utilizzati in questa tesi, per quanto sono validi per comprendere le differenze in termini di costo operativo medio annuale tra le architetture PHEVs e le BEVs.

I veicoli elettrici riportati non sono gli unici BEVs della loro tipologia ma sono da intendersi come rappresentanti della loro categoria. Per quanto concerne il BEV150 essendo esclusivamente una city car non è presa in considerazione nell'analisi ma è riportata in tabella solo come esempio per mostrare come sul mercato esistano differenti tipologie di auto elettrica che rispondono a diverse esigenze.

Tabella 25: caratteristiche dei veicoli BEV utilizzati

	Tipo di BEV	**Capacità batteria *[kWh]***	**Consumo medio *[kWh/100km]***	**Costo *[euro]***
SMART fortwo	**BEV150**	17,6	14,1	25026
Renault Twingo E-TECH	**BEV250**	22	11,5	22200
Fiat 500E	**BEV300**	42	17,7	31400
BMW i3e	**BEV300**	42	13,1	40600
Renault Zoe	**BEV400**	52	17,7	34450
TESLA Model 3 Standard Range Plus	**BEV450**	54	14,7	50.970
Hyundai Kona Electric Xline	**BEV500**	64	14,7	45000
TESLA Model 3 Long Range	**BEV600**	82	18,3	54990

Il costo dell'energia elettrica è valutato secondo quelli che sono i prezzi medi in letteratura (riportati all'inizio di questo lavoro di Tesi).

Per completare il confronto si è scelto di aggiungere al calcolo anche un veicolo convenzionale equivalente. Anche in questo caso, i dati di consumo riportati in tabella sono da intendersi come medi e certificati dal fornitore ma non testati sul software

HEVBox. In particolare, si riportano in tabella i valori di consumo di questo veicolo convenzionale equivalente.

Tabella 26: caratteristiche di consumo veicolo CICE utilizzato

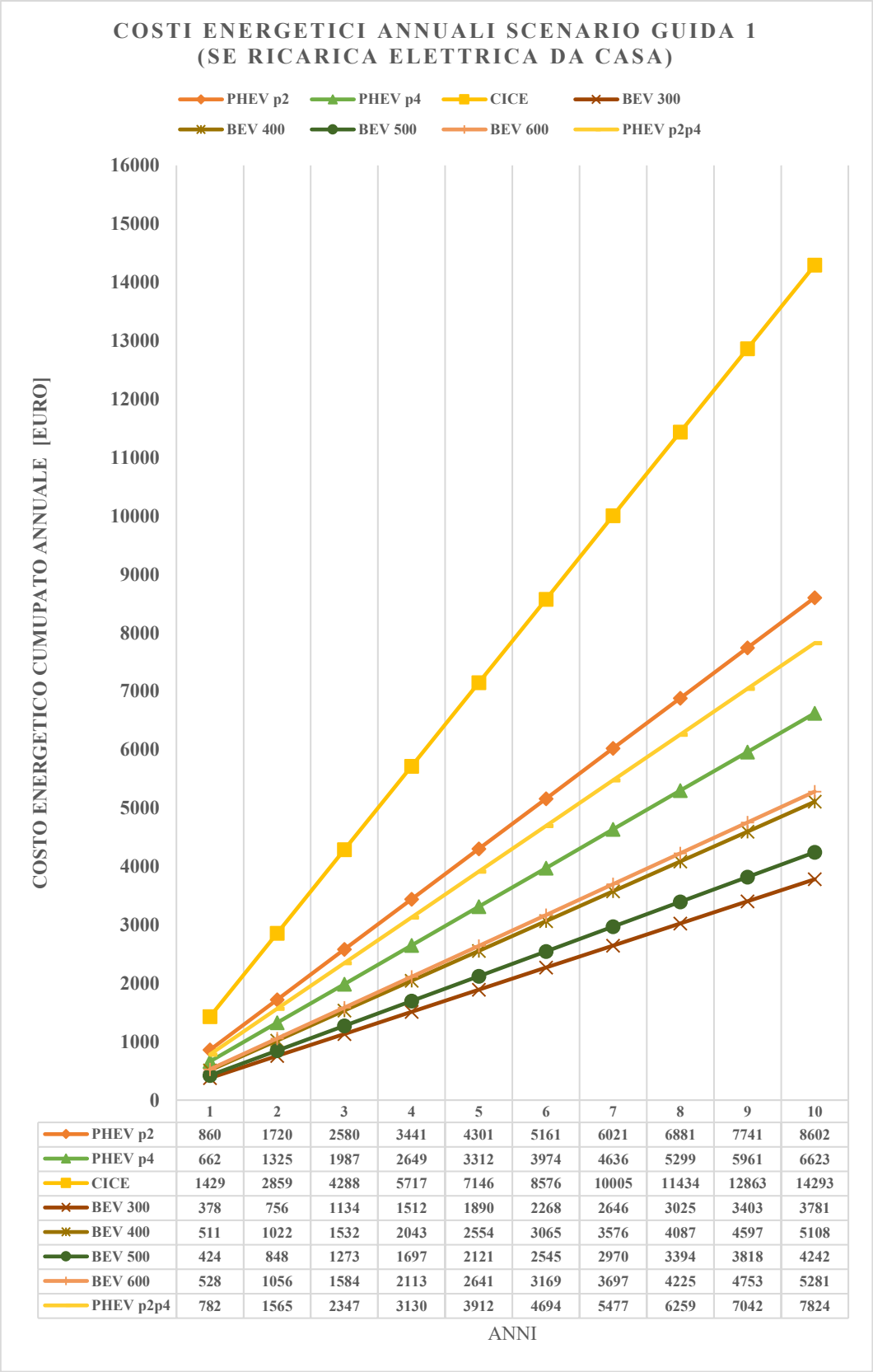
Fuel Consumption	6,5	*[l/100km]*

Si riportano, in figura, i costi energetici annuali (valutati su base decennale) delle tre architetture PHEVs analizzate, del CICE e dei BEVs sopracitati.

In questi primi quattro grafici si tiene conto della ricarica elettrica, per ogni tipologia di veicolo, esclusivamente da casa. Inoltre, per i PHEVs si tiene conto di uno S.o.C iniziale del 95%. Questa è un'ipotesi semplificativa ai fini di calcolo ma, come già evidenziato, non è la condizione preferibile per i PHEVs nei tragitti urbani ed extraurbani, per quanto è lecito supporre che l'utente di un PHEVs ricarichi il veicolo durante le ore notturne e, vista la piccola capacità del veicolo, la mattina seguente la batteria sia completamente carica.

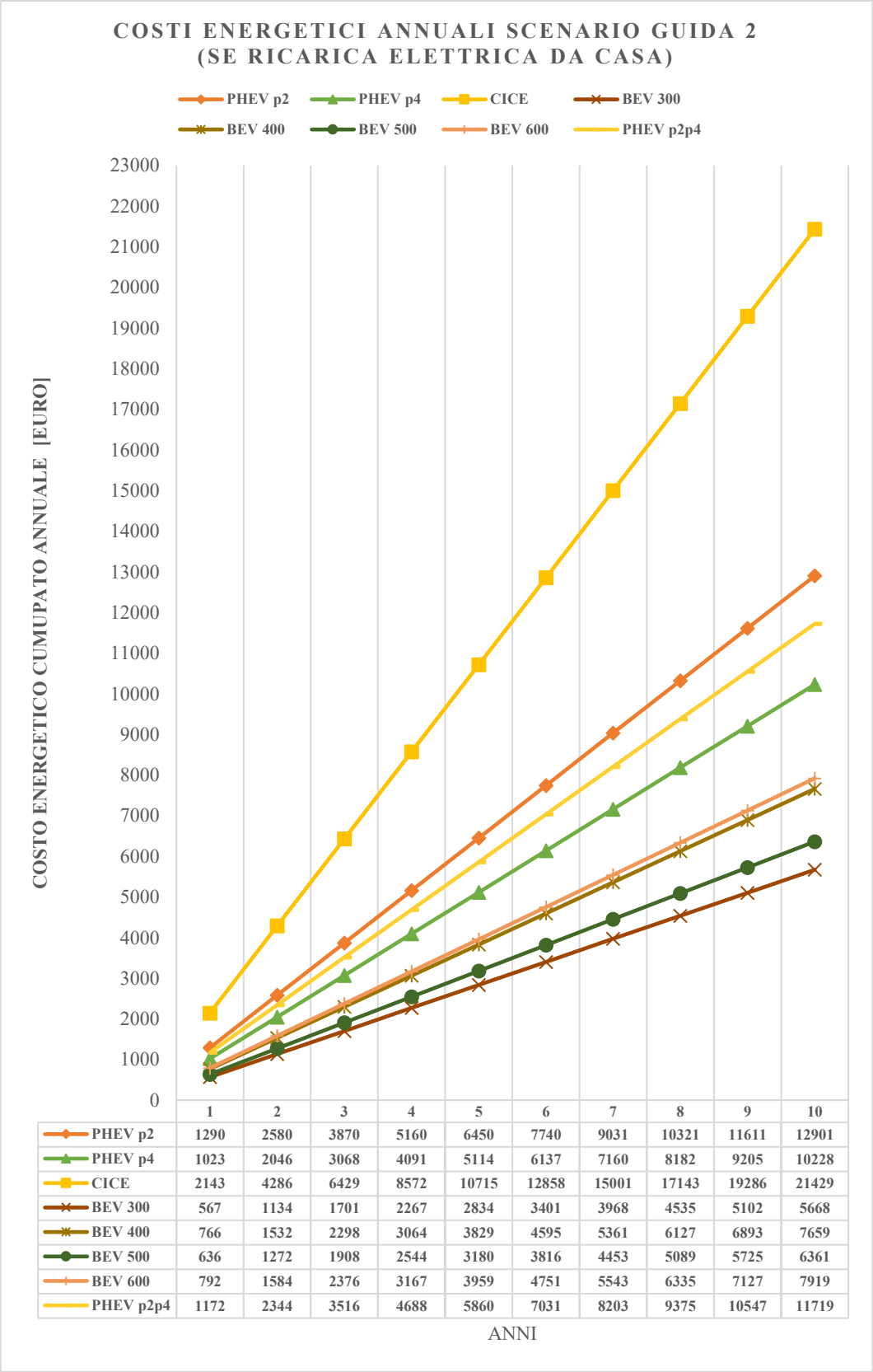
In ogni scenario risulta evidente come sia i veicoli PHEVs sia i BEVs siano estremamente più convenienti di un CICE in termini di consumi e di costo operativo nel tempo.

Come già osservato tra le architetture PHEV la p4 risulta la più conveniente in ogni scenario. Questo è dovuto alla presenza del motore elettrico unicamente e direttamente collegato alle ruote posteriori e ciò rende possibile aumentare l'efficienza globale del veicolo. È altresì vero che, come risulta evidenziato dai grafici analizzati, i veicoli che risultano essere i più convenienti sono i BEVs sostanzialmente in ogni scenario rispetto ai PHEVs, specialmente negli scenari di guida medi 2 e 4 che sono quelli con più *[km]* percorsi.



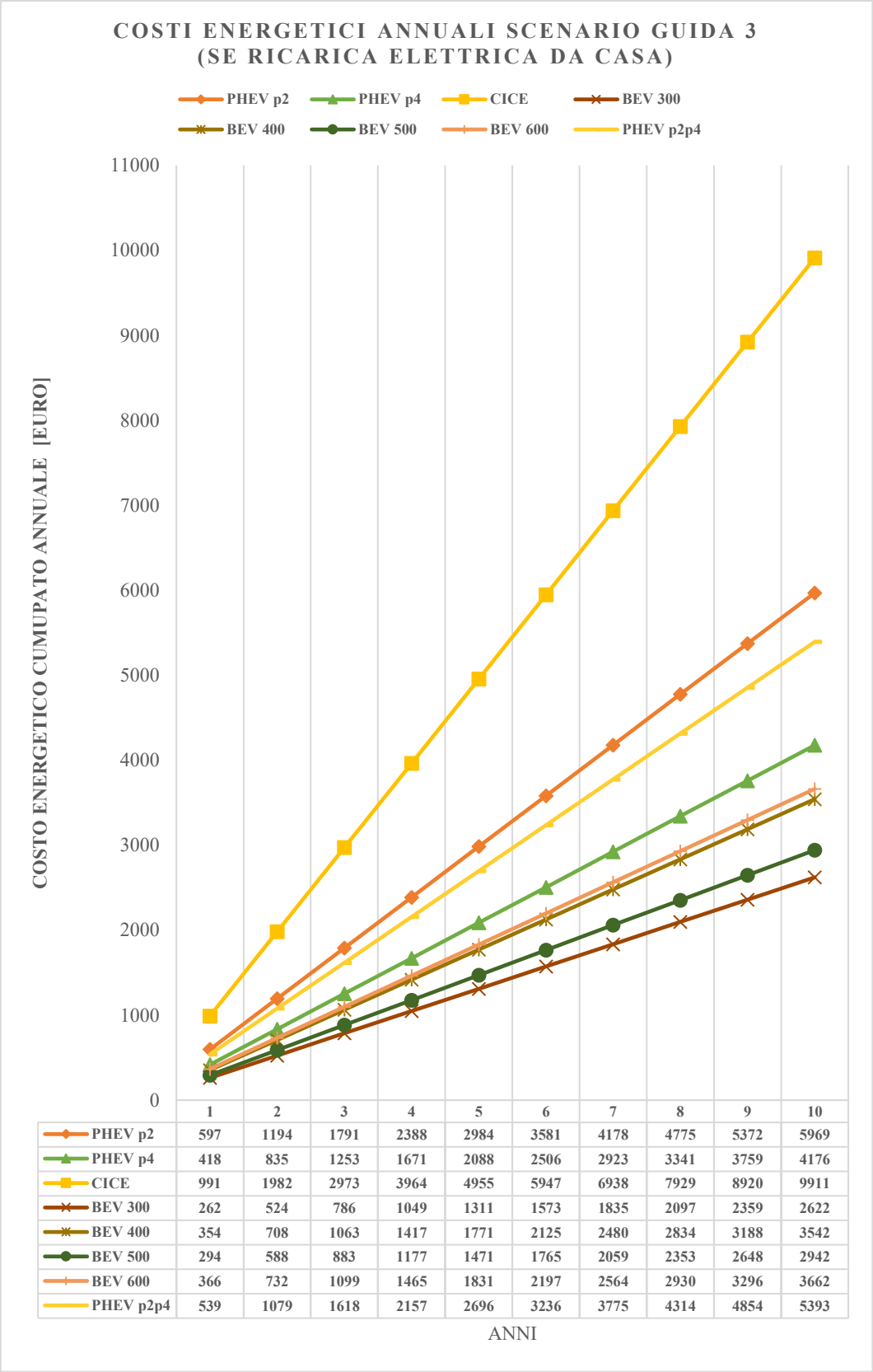
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PHEV p2	860	1720	2580	3441	4301	5161	6021	6881	7741	8602
PHEV p4	662	1325	1987	2649	3312	3974	4636	5299	5961	6623
CICE	1429	2859	4288	5717	7146	8576	10005	11434	12863	14293
BEV 300	378	756	1134	1512	1890	2268	2646	3025	3403	3781
BEV 400	511	1022	1532	2043	2554	3065	3576	4087	4597	5108
BEV 500	424	848	1273	1697	2121	2545	2970	3394	3818	4242
BEV 600	528	1056	1584	2113	2641	3169	3697	4225	4753	5281
PHEV p2p4	782	1565	2347	3130	3912	4694	5477	6259	7042	7824

Figura 133: costi energetici annuali scenario di guida 1 (ricarica elettrica da casa)



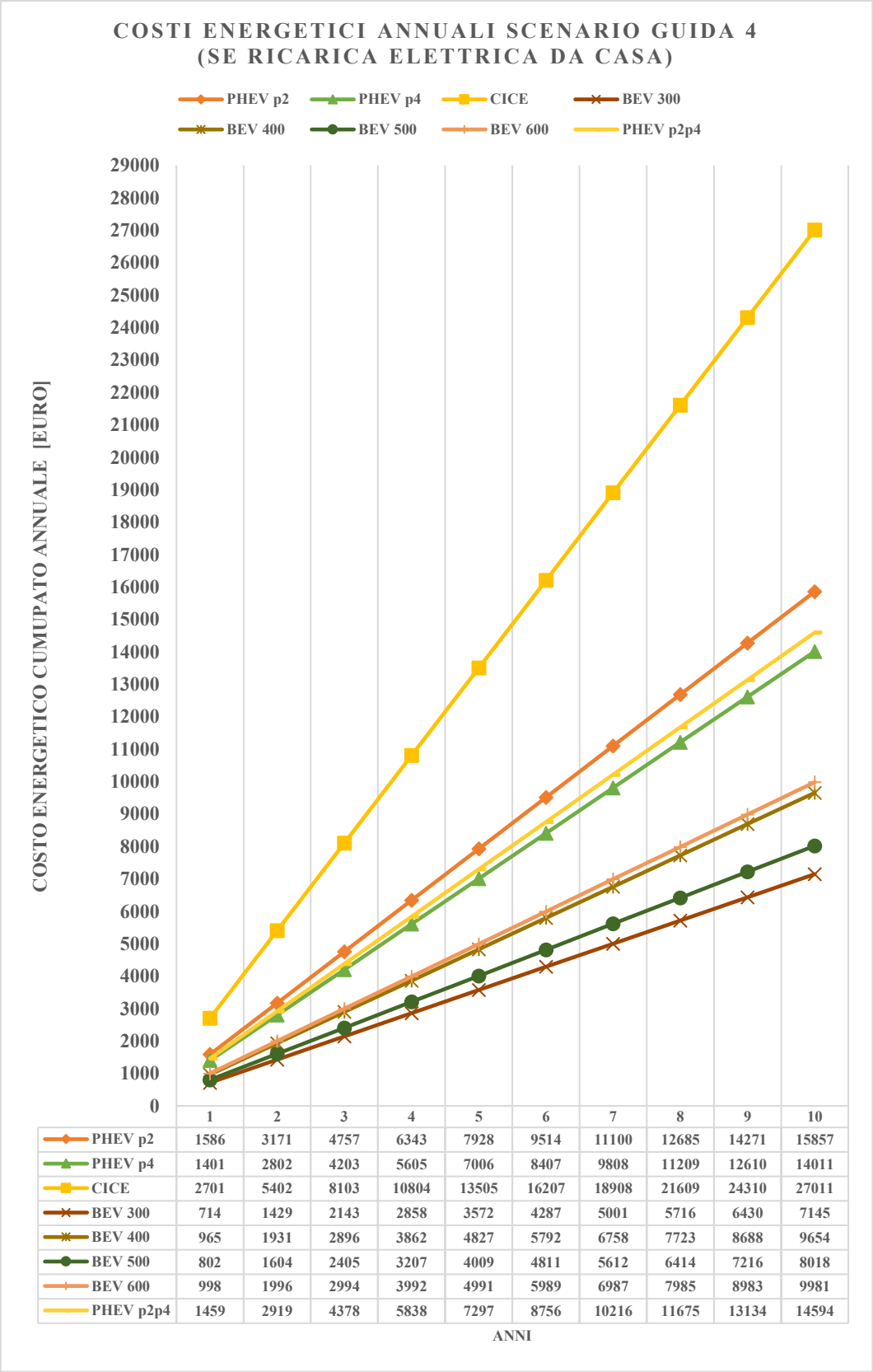
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PHEV p2	1290	2580	3870	5160	6450	7740	9031	10321	11611	12901
PHEV p4	1023	2046	3068	4091	5114	6137	7160	8182	9205	10228
CICE	2143	4286	6429	8572	10715	12858	15001	17143	19286	21429
BEV 300	567	1134	1701	2267	2834	3401	3968	4535	5102	5668
BEV 400	766	1532	2298	3064	3829	4595	5361	6127	6893	7659
BEV 500	636	1272	1908	2544	3180	3816	4453	5089	5725	6361
BEV 600	792	1584	2376	3167	3959	4751	5543	6335	7127	7919
PHEV p2p4	1172	2344	3516	4688	5860	7031	8203	9375	10547	11719

Figura 134: costi energetici annuali scenario di guida 2 (ricarica elettrica da casa)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PHEV p2	597	1194	1791	2388	2984	3581	4178	4775	5372	5969
PHEV p4	418	835	1253	1671	2088	2506	2923	3341	3759	4176
CICE	991	1982	2973	3964	4955	5947	6938	7929	8920	9911
BEV 300	262	524	786	1049	1311	1573	1835	2097	2359	2622
BEV 400	354	708	1063	1417	1771	2125	2480	2834	3188	3542
BEV 500	294	588	883	1177	1471	1765	2059	2353	2648	2942
BEV 600	366	732	1099	1465	1831	2197	2564	2930	3296	3662
PHEV p2p4	539	1079	1618	2157	2696	3236	3775	4314	4854	5393

Figura 135: costi energetici annuali scenario di guida 3 (ricarica elettrica da casa)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PHEV p2	1586	3171	4757	6343	7928	9514	11100	12685	14271	15857
PHEV p4	1401	2802	4203	5605	7006	8407	9808	11209	12610	14011
CICE	2701	5402	8103	10804	13505	16207	18908	21609	24310	27011
BEV 300	714	1429	2143	2858	3572	4287	5001	5716	6430	7145
BEV 400	965	1931	2896	3862	4827	5792	6758	7723	8688	9654
BEV 500	802	1604	2405	3207	4009	4811	5612	6414	7216	8018
BEV 600	998	1996	2994	3992	4991	5989	6987	7985	8983	9981
PHEV p2p4	1459	2919	4378	5838	7297	8756	10216	11675	13134	14594

Figura 136: costi energetici annuali scenario di guida 4 (ricarica elettrica da casa)

11.6 Confronto tra i costi energetici annuali in caso di ricarica elettrica parzialmente pubblica

L'analisi appena condotta ed i conseguenti grafici che la dettagliano sono troppo semplificativi. In realtà, se è lecito supporre che i veicoli PHEVs possano essere ricaricati con una ricarica elettrica al 100% domestica (in quanto la batteria non è l'unico accumulatore energetico a bordo) lo stesso non si può dire per i BEVs. Infatti, questi ultimi, in primis necessitano di tempi per la ricarica elettrica molto più lunghi e pertanto non è detto che il fabbisogno energetico riesca ad essere soddisfatto da una ricarica domestica lenta (tipicamente notturna); in secondo luogo, essendo l'energia elettrica l'unica fonte energetica a bordo, durante l'anno è inevitabile per l'utente far ricorso all'infrastruttura di ricarica pubblica o pubblica ad uso privato che, però, è accessibile a prezzi nettamente superiori rispetto al contratto domestico.

Il problema dovuto al tempo di ricarica può essere risolto con un adeguamento del contatore elettrico di casa ed una conseguente installazione di una wallbox presso l'abitazione. Questi adeguamenti sono assolutamente indispensabili per la ricarica di un veicolo elettrico poiché la batteria, per essere ricaricata a sufficienza, necessita di un impianto elettrico più performante rispetto al tipico impianto domestico. Un veicolo PHEV, invece, avendo una batteria piccola ed un motore endotermico può soddisfare il suo fabbisogno con una ricarica elettrica lenta e quindi l'utente non ha necessità di installare la wallbox né di adeguare l'impianto elettrico.

Come menzionato, l'utente di un veicolo BEV ha necessità anche di usufruire della ricarica pubblica che, negli ultimi anni, in Italia, sta subendo una sostanziale crescita e capillarizzazione.

L'utente di un PHEV, invece, anche se ha la batteria scarica può continuare ad utilizzare il veicolo tramite il motore endotermico (con batteria scarica il PHEV funzionerà come un full hybrid) ed aspettare il rientro presso l'abitazione per effettuare la ricarica elettrica senza quindi ricorrere alla ricarica pubblica. Questo, inoltre, riduce la "driver-anxiety" dell'utente in quanto l'autonomia di un PHEV è nettamente superiore a quella di un BEV.

La ricarica elettrica pubblica può essere di tre tipi in Italia:

- Modalità lenta a 22 kW con costo medio di 0,4-0,45 euro al kWh;
- Modalità veloce a 50 kW con costo medio di 0,5 euro al kWh;
- Modalità ultraveloce a >50kW con costo medio di 0,79 euro al kWh;

Ai fini del successivo confronto si è ipotizzato per i BEV un 70% di ricarica elettrica da casa e un 30% di ricarica elettrica pubblica, ripartita equamente tra modalità veloce e lenta.

I costi per l'adeguamento dell'impianto elettrico e della wallbox sono inseriti in tabella 27.

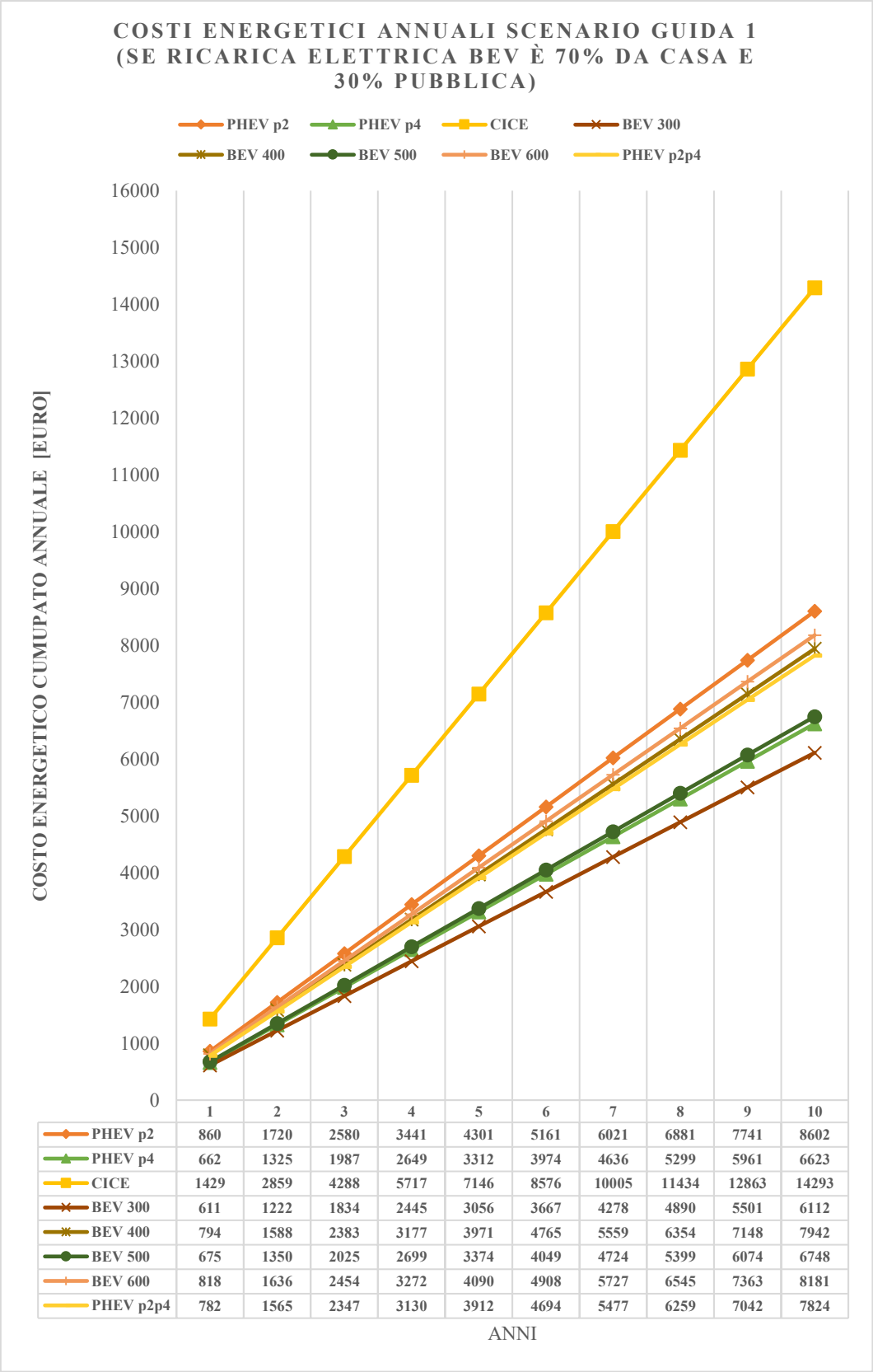
Tabella 27: costi Wall Box e costo adeguamento impianto

COSTI ULTERIORI BEV	COSTO
Costo adeguamento impianto	300 (Eur)
Costo medio Wall Box Slow (fino a 7,4 kW)	1200 (Eur)

Questi costi sono ripartiti equamente nei 10 anni di analisi e, per quanto riguarda la wallbox, si è ipotizzata una riduzione del 50% del costo nominale grazie agli incentivi introdotti nel 2021.

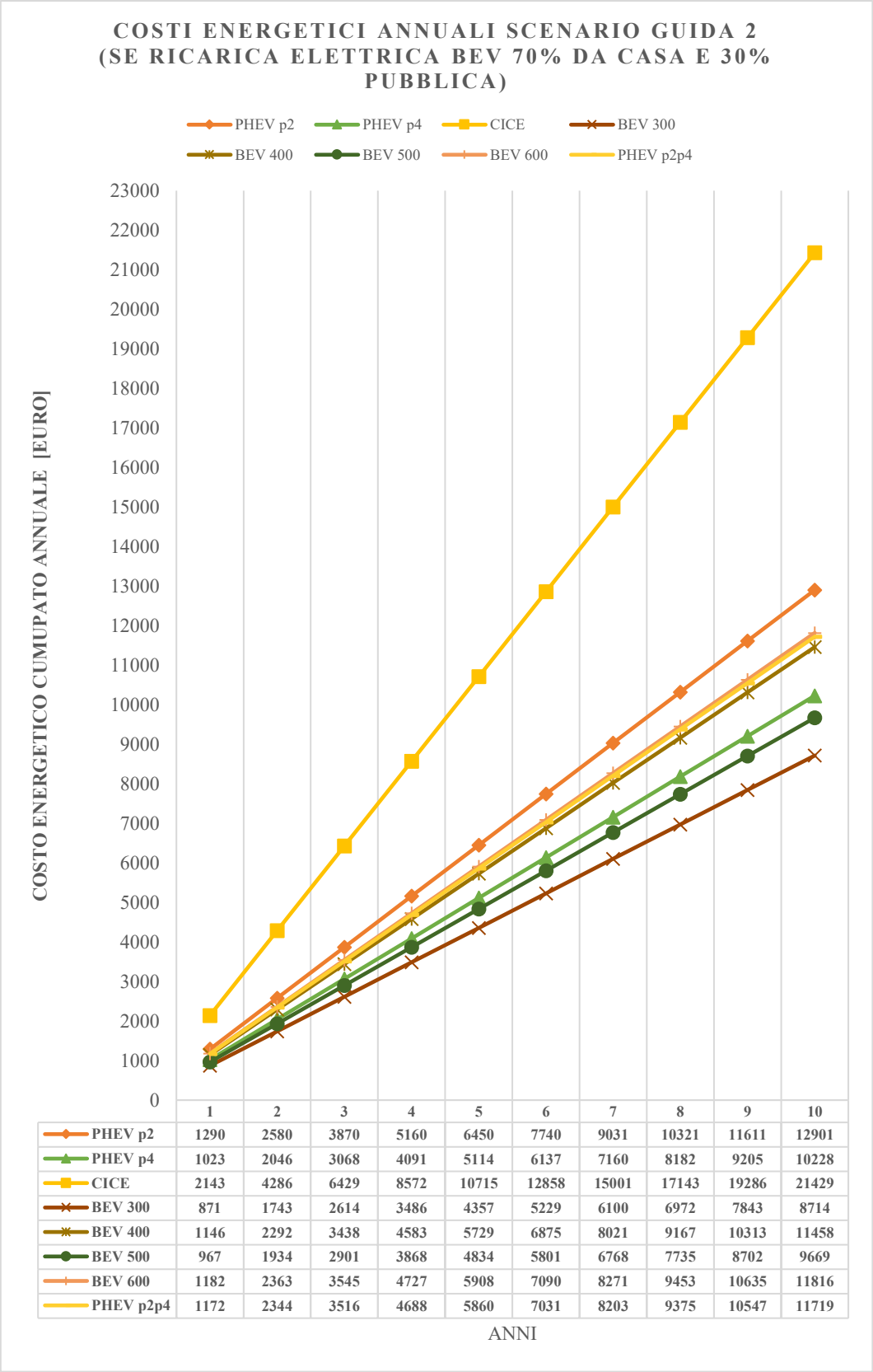
Si riportano in figura gli stessi grafici di prima tenendo conto delle considerazioni aggiuntive introdotte.

Anche in questo caso lo SOC iniziale dei PHEVs è assunto al 95%.



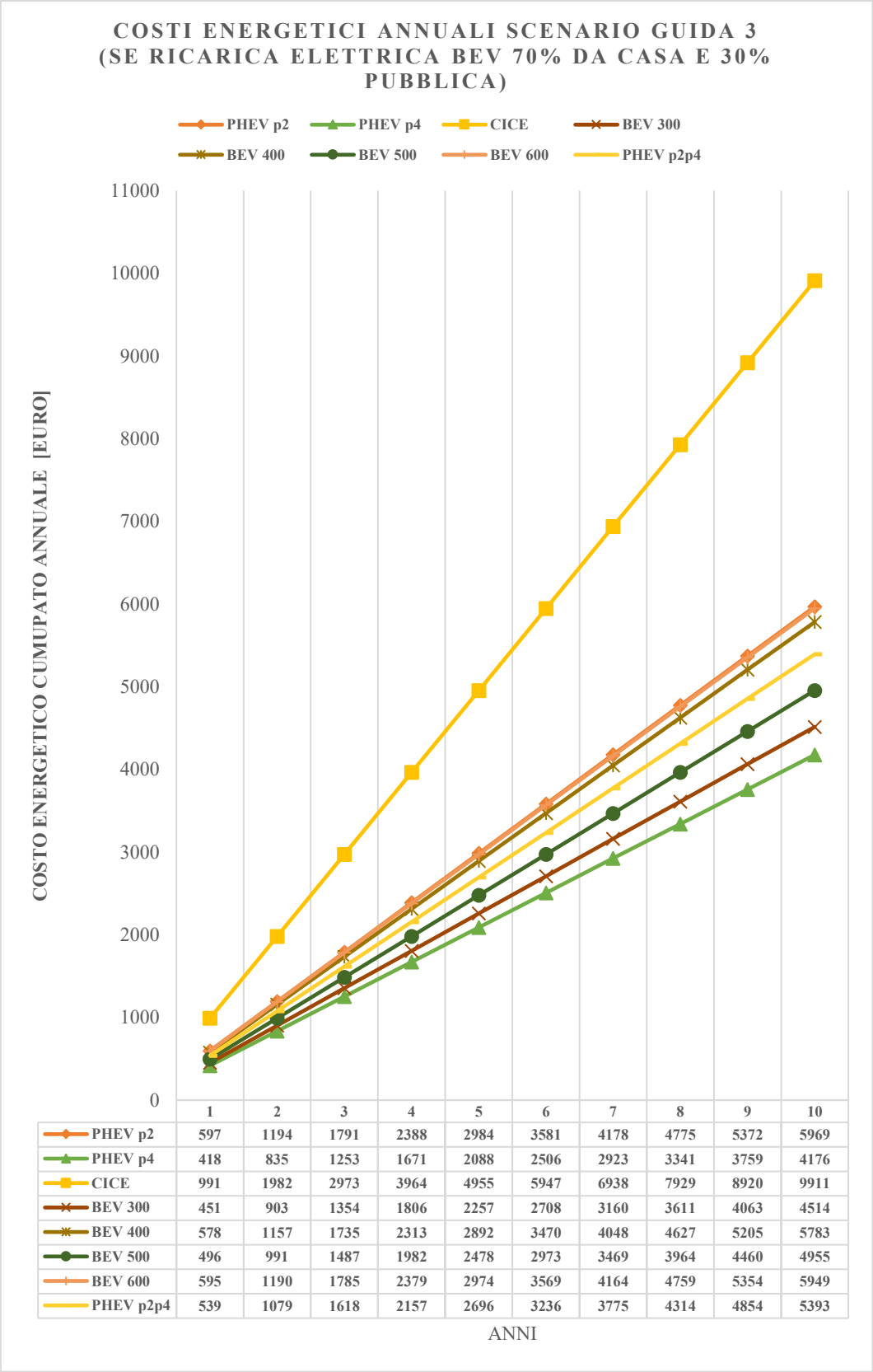
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PHEV p2	860	1720	2580	3441	4301	5161	6021	6881	7741	8602
PHEV p4	662	1325	1987	2649	3312	3974	4636	5299	5961	6623
CICE	1429	2859	4288	5717	7146	8576	10005	11434	12863	14293
BEV 300	611	1222	1834	2445	3056	3667	4278	4890	5501	6112
BEV 400	794	1588	2383	3177	3971	4765	5559	6354	7148	7942
BEV 500	675	1350	2025	2699	3374	4049	4724	5399	6074	6748
BEV 600	818	1636	2454	3272	4090	4908	5727	6545	7363	8181
PHEV p2p4	782	1565	2347	3130	3912	4694	5477	6259	7042	7824

Figura 137: costi energetici annuali scenario di guida 1 (se ricarica elettrica è 70% da casa e 30% pubblica)



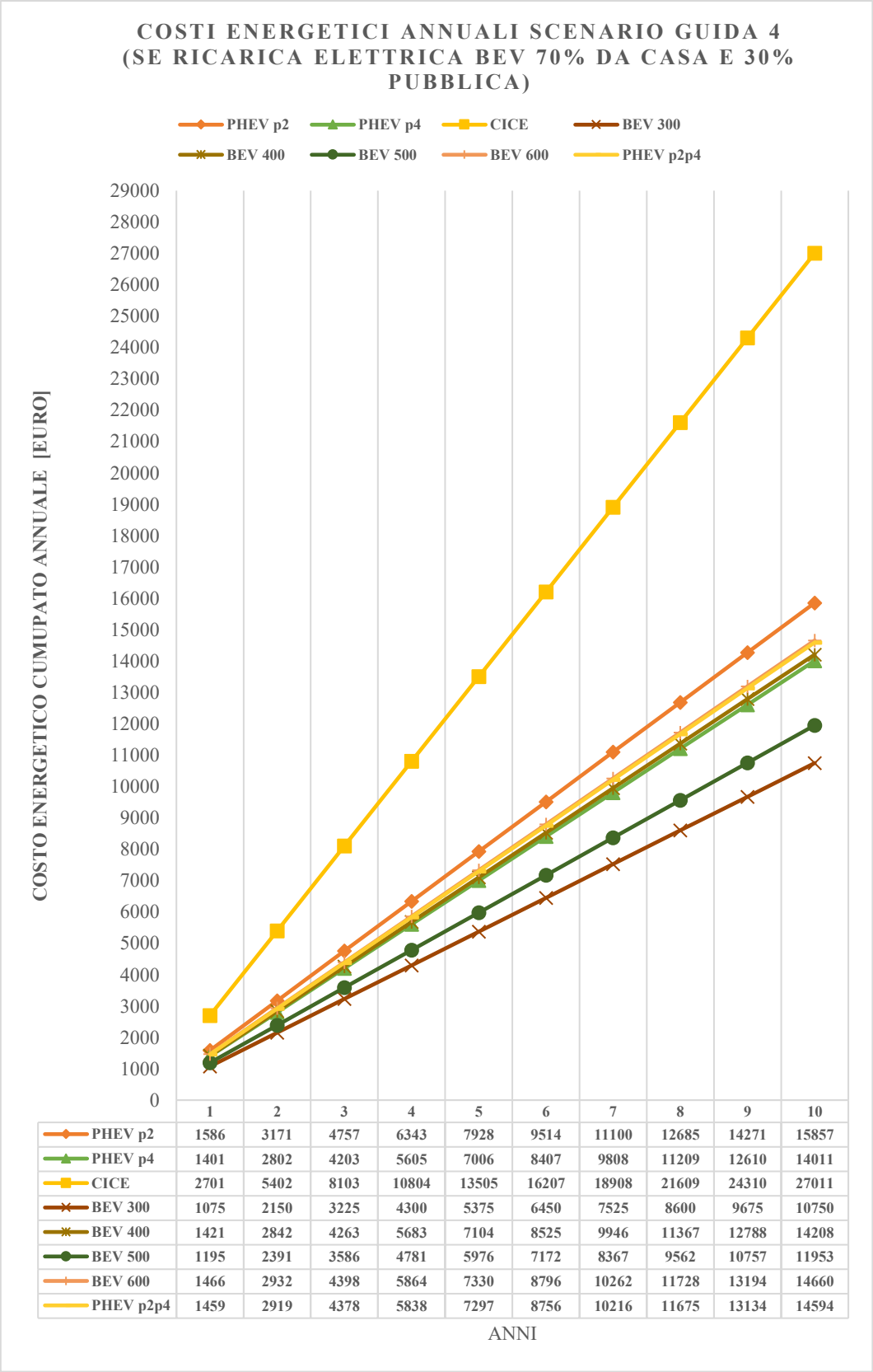
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PHEV p2	1290	2580	3870	5160	6450	7740	9031	10321	11611	12901
PHEV p4	1023	2046	3068	4091	5114	6137	7160	8182	9205	10228
CICE	2143	4286	6429	8572	10715	12858	15001	17143	19286	21429
BEV 300	871	1743	2614	3486	4357	5229	6100	6972	7843	8714
BEV 400	1146	2292	3438	4583	5729	6875	8021	9167	10313	11458
BEV 500	967	1934	2901	3868	4834	5801	6768	7735	8702	9669
BEV 600	1182	2363	3545	4727	5908	7090	8271	9453	10635	11816
PHEV p2p4	1172	2344	3516	4688	5860	7031	8203	9375	10547	11719

Figura 138: costi energetici annuali scenario di guida 2 (se ricarica elettrica è 70% da casa e 30% pubblica)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PHEV p2	597	1194	1791	2388	2984	3581	4178	4775	5372	5969
PHEV p4	418	835	1253	1671	2088	2506	2923	3341	3759	4176
CICE	991	1982	2973	3964	4955	5947	6938	7929	8920	9911
BEV 300	451	903	1354	1806	2257	2708	3160	3611	4063	4514
BEV 400	578	1157	1735	2313	2892	3470	4048	4627	5205	5783
BEV 500	496	991	1487	1982	2478	2973	3469	3964	4460	4955
BEV 600	595	1190	1785	2379	2974	3569	4164	4759	5354	5949
PHEV p2p4	539	1079	1618	2157	2696	3236	3775	4314	4854	5393

Figura 139: costi energetici annuali scenario di guida 3 (se ricarica elettrica è 70% da casa e 30% pubblica)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PHEV p2	1586	3171	4757	6343	7928	9514	11100	12685	14271	15857
PHEV p4	1401	2802	4203	5605	7006	8407	9808	11209	12610	14011
CICE	2701	5402	8103	10804	13505	16207	18908	21609	24310	27011
BEV 300	1075	2150	3225	4300	5375	6450	7525	8600	9675	10750
BEV 400	1421	2842	4263	5683	7104	8525	9946	11367	12788	14208
BEV 500	1195	2391	3586	4781	5976	7172	8367	9562	10757	11953
BEV 600	1466	2932	4398	5864	7330	8796	10262	11728	13194	14660
PHEV p2p4	1459	2919	4378	5838	7297	8756	10216	11675	13134	14594

Figura 140: costi energetici annuali scenario di guida 4 (se ricarica elettrica è 70% da casa e 30% pubblica)

Tenendo conto di queste informazioni aggiuntive è possibile osservare come il PHEV p4 sia diventato più attraente rispetto alla maggior parte dei BEVs sostanzialmente in ogni scenario di guida.

In particolare, negli scenari 1, 2 e 4 il veicolo più conveniente è il BEV300. Tuttavia, tale veicolo, per definizione, non è consigliato per percorrenze annuali molto lunghe e quindi sicuramente l'ipotesi di solo un 30% di ricarica elettrica pubblica è certamente troppo bassa per questo modello di BEV.

Anche il BEV500 risulta più conveniente negli scenari 2 e 4 rispetto al PHEV p4. Questo tipo di veicolo solo elettrico è sicuramente più adatto alle lunghe percorrenze. Tuttavia, i veicoli solo elettrici che dispongono di questa autonomia sono di fascia molto alta e con un prezzo di acquisto di almeno 40000-50000 euro. Potrebbe essere più conveniente, quindi, anche a parità di prezzo, disporre di un doppio sistema energetico a bordo per poter fronteggiare qualsiasi evenienza ed utilizzare il veicolo in tranquillità e, di conseguenza, anche in questo caso preferire il PHEV.

12. Il costo della ricarica elettrica

Per completare l'analisi riguardante i costi operativi annuali è necessario effettuare un focus sul costo della ricarica elettrica, effettuando un confronto tra quanto trovato in a questo lavoro di tesi, e quanto analizzato nell'articolo "*Comparison: Real World Cost of Fueling EVs and ICE Vehicles; (2021) [25]",* che mostra come, in America (in particolare prendendo come caso studio lo stato del Michigan) ricaricare un'auto elettrica possa essere, a conti fatti, persino più costoso rispetto ad un veicolo convenzionale.

L'articolo, a tal proposito, spiega come il costo della ricarica elettrica non debba essere preso semplicemente come un dato numerico bensì occorra tener presente di tutto ciò che ruota intorno a questo tipo di ricarica. Infatti, specialmente per un veicolo puramente elettrico, è necessario tener conto del prezzo della wallbox domestica, la variazione del costo della ricarica elettrica in funzione della potenza, l'efficienza del distributore, i chilometri "morti" che si percorrono per arrivare ad un punto di ricarica, la tassa annuale di registrazione (presente in America per i veicoli elettrici) ed infine, sebbene possa essere un dato soggettivo, è importante soffermarsi sul tempo di ricarica, che rappresenta a tutti gli effetti un costo-opportunità, in quanto questo tempo è sottratto ad altre occupazioni che si sarebbero potute fare altrimenti. Questi costi, che non sono presenti nel costo della ricarica elettrica, vengono spesso trascurati dall'utente che, in un anno, si troverà a spendere molto più di quanto preventivato. Ciò non succede, invece, con il combustibile liquido tradizionale, il cui prezzo al litro tiene conto già del costo della pompa e delle accise. Inoltre, l'efficienza di ricarica è pressoché unitaria ed il costo-opportunità del rifornimento tradizionale (che è molto più rapido e meno frequente rispetto a quello elettrico) è pressoché nullo.

Considerando tutto ciò, l'articolo effettua un confronto tra questi due tipi di ricarica, considerando sia diverse tipologie di veicolo (ICE e BEV di diversa taglia) sia diversi scenari di ricarica. Si riporta, in figura 141, la tabella risultante dell'articolo che tiene conto di tutte le grandezze utilizzate per effettuare il calcolo.

È facile osservare come il costo totale annuale della ricarica elettrica sia maggiore, anche sensibilmente, rispetto al costo del combustibile tradizionale. Inoltre, il peso dei chilometri "morti" e della wallbox sono difficilmente trascurabili e l'utente, quando acquista un'auto puramente elettrica, ne deve essere cosciente.

TABLE 5. **Direct Monetary Costs of Fueling ICE and EVs as of Mid 2021**

	Entry ICE *Commercial Fueling*	Mid-Priced ICE *Commercial Fueling*	Luxury ICE *Commercial Fueling*	Mid-Priced EV *Mostly Commercial Charging*	Luxury EV *Mostly Commercial Charging*	Luxury EV *Mostly Home Charging*
Purposeful miles per year	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000	12,000
Deadhead miles per year	96	96	96	960	720	480
Total miles per year	**12,096**	**12,096**	**12,096**	**12,960**	**12,720**	**12,480**
Fuel economy: miles per gallon (a), (c)	33	33	26	-	-	-
Fuel economy: miles per KWh (b), (c)	-	-	-	4.2	3.3	3.3
Fueling efficiency ratio (d)	1	1	1	0.88	0.88	0.88
Fuel units used	366.5	366.5	465.2	3,506.5	4,380.2	4,297.5
fractions: commercial share per unit of fuel	1	1	1	0.7	0.7	0.4
fractions: home share per unit of fuel	0	0	0	0.3	0.3	0.6
Commercial unit cost of fuel (per gallon or per kWh) (e)	$ 2.81	$ 2.81	$ 3.25	$ 0.43	$ 0.43	$ 0.43
Residential unit cost of fuel (per gallon or per kWh)	$ -	$ -	$ -	$ 0.17	$ 0.17	$ 0.17
weighted average cost per unit fuel (per gallon or per kWh)	$ 2.81	$ 2.81	$ 3.25	$ 0.35	$ 0.35	$ 0.27
Fueling cost per year	**$ 1,030**	**$ 1,030**	**$ 1,512**	**$ 1,234**	**$ 1,542**	**$ 1,178**
Home charger cost per year (f)	$ -	$ -	$ -	$ 120	$ 120	$ 320
Additional registration tax per year (g)	-	$ -	$ -	$ 200	$ 200	$ 200
Total fueling cost per year	**$ 1,030**	**$ 1,030**	**$ 1,512**	**$ 1,554**	**$ 1,862**	**$ 1,698**
Cost per purposeful mile	$ 0.09	$ 0.09	$ 0.13	$ 0.13	$ 0.16	$ 0.14
Fueling cost per 100 purposeful miles	**$ 8.58**	**$ 8.58**	**$ 12.60**	**$ 12.95**	**$ 15.52**	**$ 14.15**
Memo: Excise taxes on fuel per year (h)	*$ 163.85*	*$ 163.85*	*$ 207.96*	-	-	-
Memo: Cost of deadhead miles per 100 purposeful miles	*$ 0.07*	*$ 0.07*	*$ 0.10*	*$ 1.04*	*$ 0.93*	*$ 0.57*
Assumptions for each scenario:						
Deadhead miles per refueling trip	2	2	2	10	10	10
No. home charging sessions per month	-	-	-	25	25	25
Number of commercial charger/gas station trips per month	4	4	4	8	6	4

Figura 141: Direct monetary cost of fueling ICE and EV's as of Mid 2021

In figura 142, sono invece evidenziate le diverse componenti di costo che contribuiscono a descrivere il costo totale della ricarica per cento miglia. In particolare, è possibile osservare come anche considerando i costi meramente commerciali, il costo della ricarica elettrica è maggiore rispetto al combustibile tradizionale.

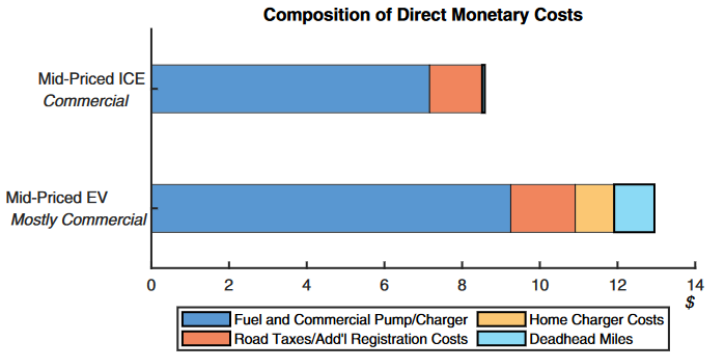


Figura 142: Composition of Direct Monetary Costs

Sulla base di questo studio e grazie ai dati raccolti in questo lavoro di tesi è possibile realizzare un confronto simile ma tra le architetture plug-in ed i veicoli BEV. Per essere coerenti con lo scenario italiano si è pensato di utilizzare lo scenario di guida uno come riferimento, in quanto è il più vicino alla percorrenza media italiana (che si aggira intorno ai 12500 chilometri annuali). Da [25] sono mutuati (anche se opportunamente adattati allo scenario di riferimento uno) i chilometri "morti" per la ricarica e l'efficienza del distributore; allo stesso tempo non è inserita una tassa di registrazione annuale specificatamente per auto elettriche, in quanto non prevista dalla legislazione italiana. I dati di consumo riportati sono invece frutto dell'analisi con il software HEVBox, per quanto riguarda gli ibridi, e sono i dati di consumo medi per quanto concerne i BEV. Infine, per i BEV sono stati previsti due scenari di ricarica:

- Ricarica 70% privata e 30% pubblica equamente ripartita tra AC e DC;
- Ricarica 50% privata e 50% pubblica equamente ripartita tra AC e DC;

Si riportano i risultati ottenuti nella tabella 28.

Si osserva, anche qui, quanto precedentemente descritto in [25], ossia che la ricarica elettrica è spesso più svantaggiosa, in particolare dell'ibrido plug-in p4 che, si conferma la scelta preferibile.

Tabella 28: Costi monetari ricarica elettrica e combustibile tradizionale

SCENARIO PRIVATO 1		PHEV p4	PHEV p2	PHEV p2p4	BEV300 70% domestica - 30% pubblica	BEV300 50% domestica - 50% pubblica	BEV400 70% domestica - 30% pubblica	BEV400 50% domestica - 50% pubblica	BEV500 70% domestica - 30% pubblica	BEV500 50% domestica - 50% pubblica	BEV600 70% domestica - 30% pubblica	BEV600 50% domestica - 50% pubblica
chilometri annuali	*[km]*	13743	13743	13743	13743	13743	13743	13743	13743	13743	13743	13743
chilometri morti	*[km]*	110	110	110	550	825	550	825	550	825	550	825
chilometri totali	***[km]***	**13853**	**13853**	**13853**	**14293**	**14568**	**14293**	**14568**	**14293**	**14568**	**14293**	**14568**
fuel economy	*[km/l]*	40,3	30,3	31,8								
fuel economy	*[km/kWh]*	9,3	7,8	9,2	7,6	7,6	5,6	5,6	6,8	6,8	5,45	5,45
fuel efficiency liquid fuel		1,0	1,0	1,0								
fuel efficiency		0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
costo combustibile	*[euro/l]*	1,6	1,6	1,6								
costo elettrico da casa	*[euro/kWh]*	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
costo elettrico fuori [AC]	*[euro/kWh]*				0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
costo elettrico fuori [DC]	*[euro/kWh]*				0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
costo medio ricarica	*[euro/kWh]*				0,29	0,34	0,29	0,34	0,29	0,34	0,29	0,34
costo home charger	*[euro/anno]*				60	60	60	60	60	60	60	60
costo adeguamento impianto	*[euro/anno]*				30	30	30	30	30	30	30	30
costo totale annuale	***[euro]***	**711**	**918**	**832**	**722**	**852**	**938**	**1112**	**798**	**942**	**967**	**1146**
costo al chilometro	*[euro]*	**0,05**	**0,07**	**0,06**	**0,05**	**0,06**	**0,07**	**0,08**	**0,06**	**0,06**	**0,07**	**0,08**
costo per cento chilometri	***[euro]***	**5,1**	**6,6**	**6,0**	**5,1**	**5,8**	**6,6**	**7,6**	**5,6**	**6,5**	**6,8**	**7,9**

Infine, occorre considerare che se ricaricare un BEV risulta svantaggioso anche con una quota di ricarica pubblica o pubblica ad uso privato pari al 30%-50%, è naturale osservare che per chi non disponga della possibilità di effettuare il rifornimento elettrico presso l'abitazione, il BEV sia la soluzione peggiore in assoluto. Infatti, chi vive in un condominio difficilmente avrà la possibilità di ricaricare l'auto nel proprio garage poiché non avrà un posto fisso dove parcheggiare l'auto e dovrà necessariamente ricorrere all'infrastruttura pubblica. Questo non solo incrementerebbe i costi operativi annuali del BEV ma porrebbe un serio vincolo alla quotidianità dell'utente che si troverebbe costretto a veder sottratto molto tempo della sua giornata per effettuare la ricarica (non sarebbe infatti ragionevole pensare ad una ricarica notturna in questo caso).

Ovviamente, in questo scenario, l'utente del PHEV non sarebbe esente da queste due problematiche, ma quantomeno sarebbero molto attenuate poiché, come ampiamente

dettagliato, l'energia elettrica non è l'unica fonte a bordo di un ibrido plug-in e, in virtù della batteria più piccola, i tempi di ricarica sarebbero ridotti.

Uno scenario del genere potrebbe non essere raro in Italia, dove, secondo quanto riportato in *[24],* una grossa fetta della popolazione non dispone di un posto privato per l'auto. Infatti, come si può osservare dalle figure 143 e 144, vi è un enorme differenza territoriale nella percentuale di garage per abitazione tra Nord e Sud e tra piccoli e grandi comuni.

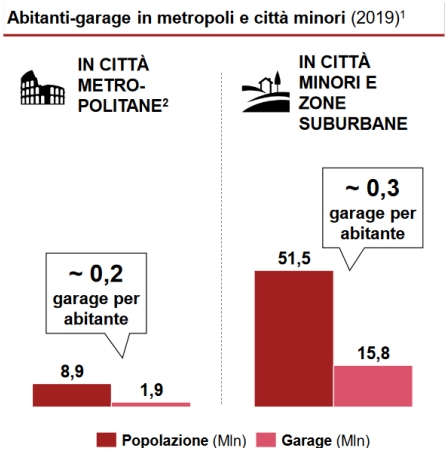


Figura 143: rapporto abitanti-garage in metropoli e città minori

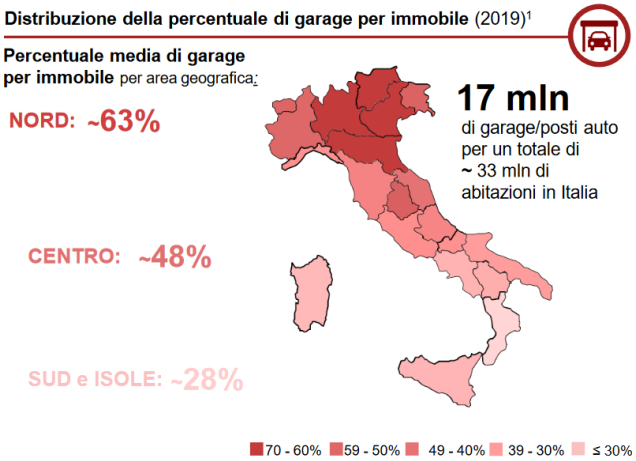


Figura 144: Distribuzione della percentuale di garage per immobile

Ipotizzando quindi uno scenario di questo tipo (trascurando i chilometri "morti" per effettuare la ricarica) applicato allo scenario uno di guida, si riportano in tabella 29 i costi operativi annuali e per cento chilometri delle motorizzazioni PHEV e BEV analizzate.

In questo scenario il BEV300 ed il BEV500 (subito seguite dal PHEV p4 con batteria carica completamente) sono le soluzioni economicamente più convenienti. Tuttavia, il costo opportunità relativo al tempo per effettuare la ricarica e i chilometri "morti" per arrivare presso l'infrastruttura di ricarica sono sicuramente delle variabili che permettono di osservare come, per chi non disponga di un garage, una soluzione puramente elettrica non sia attualmente percorribile. Dall'altro lato, sebbene inquinando di più, ad un eventuale possessore di PHEV, in questo scenario, converrebbe utilizzare il veicolo con la batteria scarica come fosse un full hybrid. Inoltre, il costo totale annuale se il PHEV p4 è completamente scarico è inferiore anche ai costi dei BEVs analizzati.

Dai dati analizzati risulta evidente come, queste due tipologie di veicolo, si rivolgono, vista l'infrastruttura di ricarica elettrica, ad un utente che abbia la possibilità di ricaricare il veicolo da casa, con la differenza, non trascurabile, che il veicolo PHEV permette comunque la possibilità di funzionare, anche prevalentemente, con il motore endotermico.

Tabella 29: Costo ricarica elettrica in uno scenario esclusivamente di ricarica pubblica

SCENARIO PRIVATO 1		PHEV p4	PHEV p4 completamente scarico	PHEV p2	PHEV p2p4	BEV300 100% pubblica	BEV400 100% pubblica	BEV500 100% pubblica	BEV600 100% pubblica
chilometri annuali	[km]	13743	13743	13743	13743	13743	13743	13743	13743
costo combustibile	[euro/l]	1,6	1,6	1,6	1,6				
costo elettrico medio	[euro/kWh]	0,475		0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475
fuel efficiency		0,88		0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
costo totale annuale	**[euro]**	**1152**	**920**	**1442**	**1275**	**972**	**1321**	**1090**	**1357**
costo al chilometro	[euro]	0,08	0,07	0,10	0,09	0,07	0,10	0,08	0,10
costo per cento chilometri	**[euro]**	**8,4**	**6,7**	**10,5**	**9,3**	**7,1**	**9,6**	**7,9**	**9,9**

13. Total cost of ownership dei PHEVs e BEVs

Mettendo insieme i costi fissi dei veicoli PHEVs e BEVs ed i costi operativi, è possibile osservare il *Total cost of ownership (TCO)* che l'utente è tenuto a sostenere, dopo cinque e dieci anni per ogni tipologia di veicolo analizzato. I risultati sono riportati per tutti e quattro gli scenari nei grafici successivamente descritti, considerando, per i costi operativi dei BEVs e dei PHEVs lo scenario delineato nel paragrafo 11.6.

Risulta evidente, dai grafici in figura 145 a 148 come le architetture PHEV, specialmente la p4, siano spesso più convenienti rispetto alle soluzioni elettriche oggi presenti sul mercato, specialmente se i veicoli puramente elettrici sono di grossa taglia e con un'autonomia dichiarata superiore alla media attuale dei BEVs.

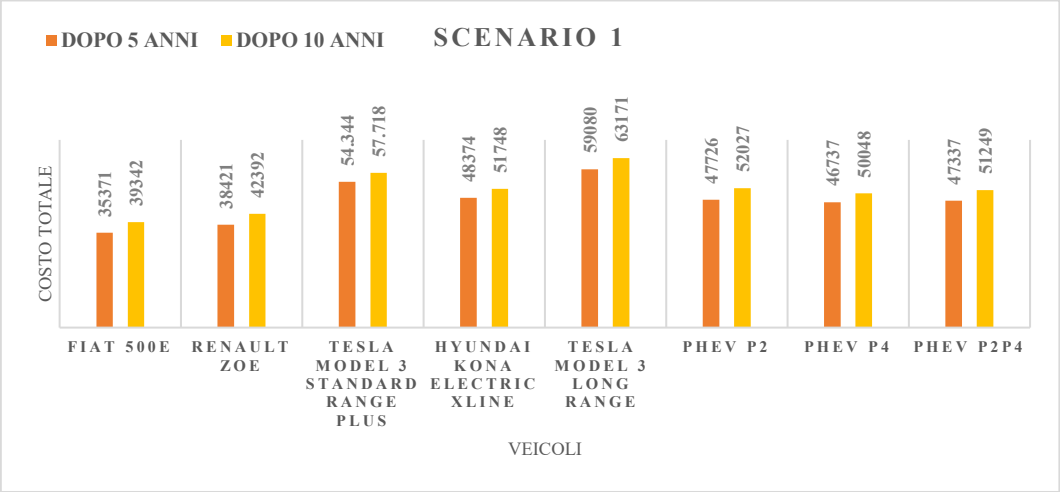


Figura 145: TCO scenario 1

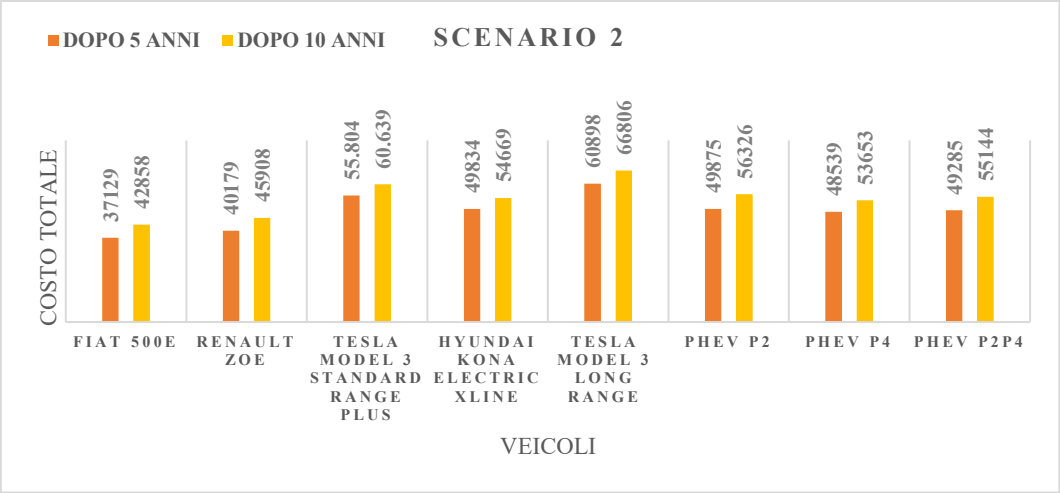


Figura 146: TCO scenario 2

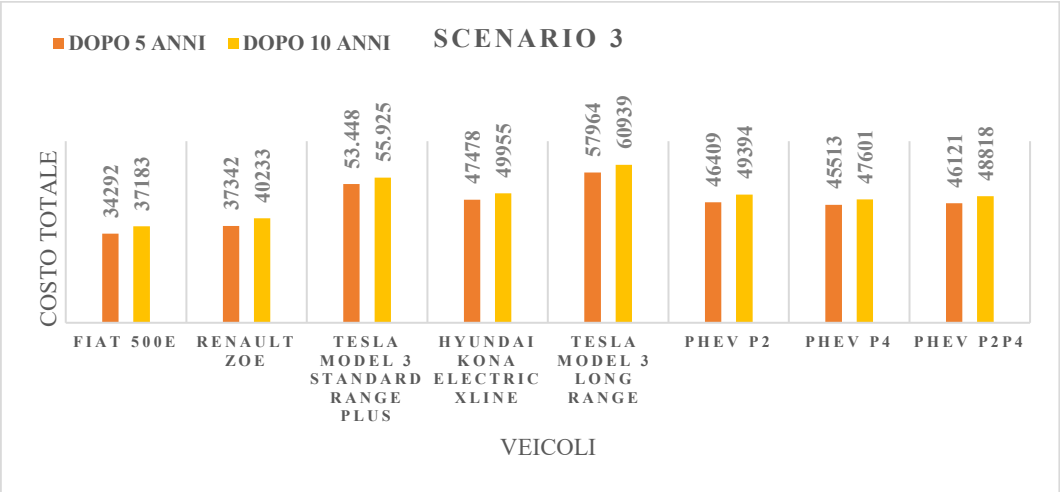


Figura 147: TCO scenario 3

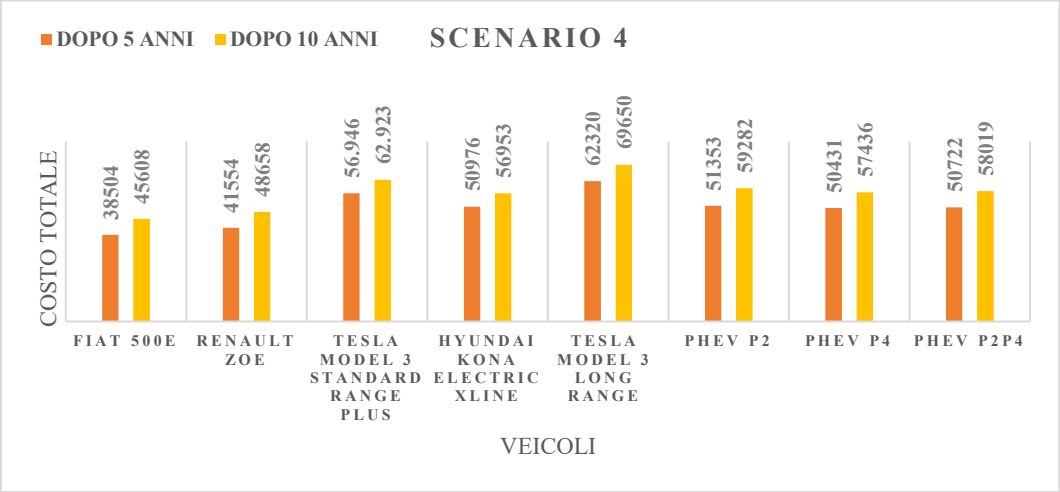


Figura 148: TCO scenario 4

I limiti di un'analisi del genere rimangono comunque molti, in quanto nel costo operativo non si è tenuto conto dei costi di manutenzione, dell'assicurazione annuale e della tassa di circolazione. Integrare questi dati può rappresentare un ulteriore step di analisi in quanto vi sono delle differenze non di poco conto tra le diverse motorizzazioni rispetto a questi costi che l'utente è tenuto a sostenere. Infatti, contando su una minor componentistica, l'utente di un BEV mediamente sostiene dei costi di manutenzione più bassi rispetto all'acquirente di un veicolo ibrido. Inoltre, sebbene con le dovute differenze tra regioni e paesi, i BEV godono mediamente di polizze assicurative mediamente più basse rispetto ai veicoli convenzionali e possono usufruire di riduzioni anche sulla tassa di circolazione.

Infine, sarebbe opportuno considerare anche il deprezzamento a cui questo tipo di veicoli va incontro nel corso degli anni. Infatti, come riportato in *"Car cost Index 2021, [26]"* queste due tipologie di veicoli subiscono un deprezzamento, nel corso degli anni, molto maggiore rispetto alle motorizzazioni convenzionali. Questo può rappresentare un problema per l'utente che acquista un veicolo BEV o PHEV nuovo e dopo un certo numero di anni lo piazza sul mercato dell'usato per la sua vendita. Inoltre, la vasta gamma di incentivi messi a disposizione dalle nazioni sono molto ridotti (e talvolta assenti) se l'acquisto del veicolo avviene sul mercato dell'usato che però rappresenta una grossa fetta del mercato automotive odierno. Secondo quanto riportato da *"News auto [27]"*, che riprende i dati forniti dall'ACI, le immatricolazioni nel 2020 sono state 1.381.496, a fronte di 3.018.301 passaggi di proprietà nel medesimo anno. Questo segnala come il mercato dell'usato, percentualmente, sia il più rilevante e, per l'utente, scegliere un veicolo che subisca negli anni un deprezzamento più rapido non è una scelta economicamente attraente.

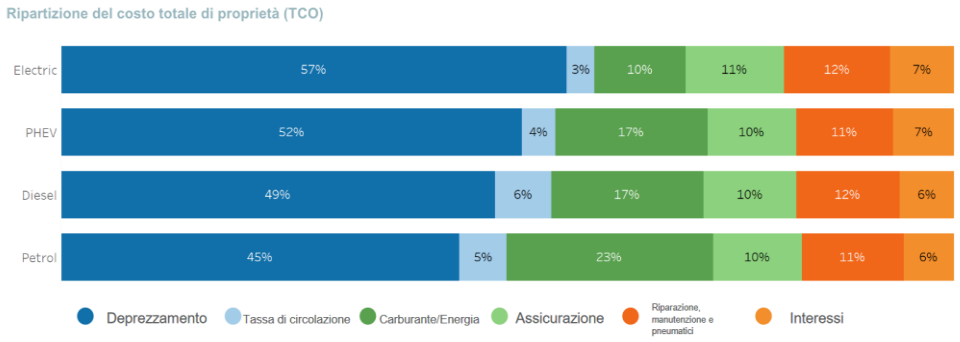


Figura 149: TCO delle diverse motorizzazioni

Per completezza, si riporta il break even point della ricarica elettrica confrontando i veicoli BEV analizzati con il PHEV p4 con batteria completamente scarica. Dal grafico in figura 150 si può osservare come, per un prezzo della ricarica elettrica superiore a 0,49 [Euro/kWh] l'ibrido plug-in scarico sia migliore rispetto ad ogni BEV analizzato. Considerando che attualmente la ricarica elettrica pubblica DC in Italia ha un prezzo di almeno 0,5 [Euro/kWh], sino ad arrivare all'estremo di 0,79 [Euro/kWh] per le ricariche ultraveloci, si può concludere che con ricariche di questo tipo, ai già ampiamente citati limiti di un veicolo BEV, si deve aggiungere anche un costo operativo estremamente alto.

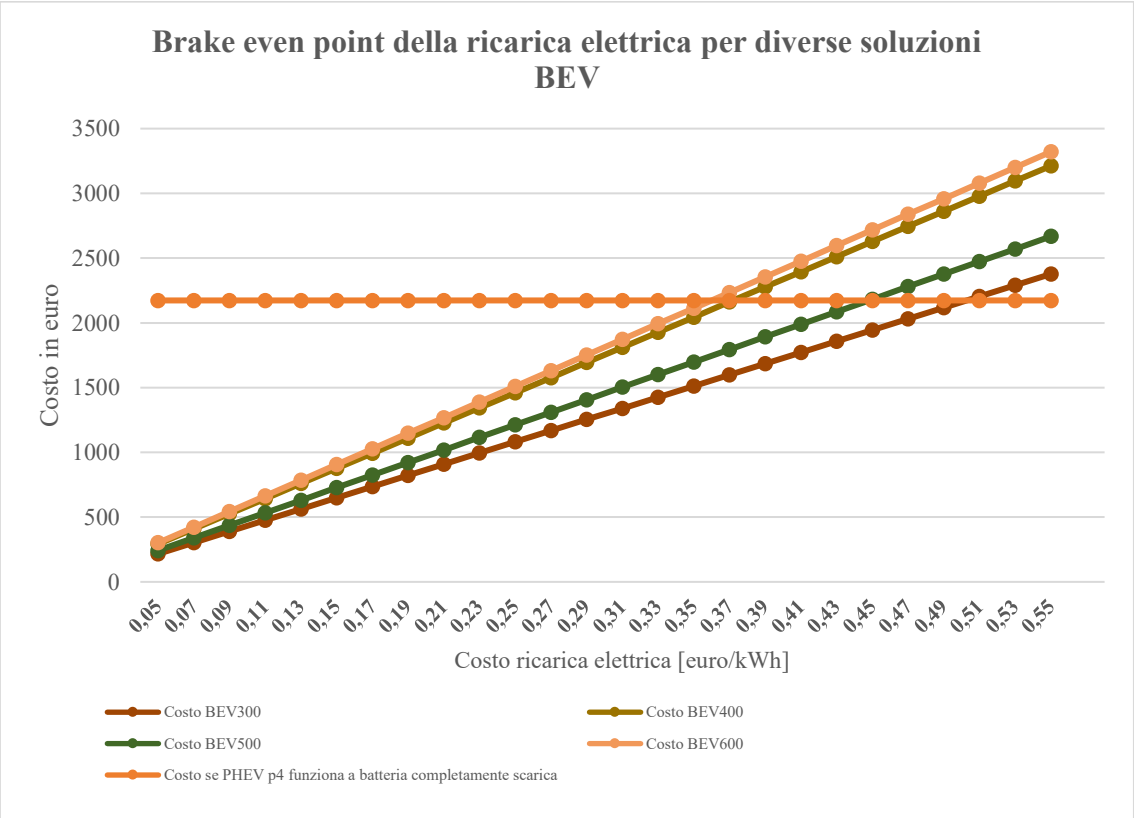


Figura 150: Break even point della ricarica elettrica per diverse soluzioni BEV

14. Stato dell'arte

Il lavoro di tesi qui presentato si è posto l'obiettivo di indagare se il passaggio a soluzioni BEV e PHEV possa essere economicamente sostenibile per l'utente e se ci sia una scelta preferibile per l'acquirente tra queste due motorizzazioni.

Il tema trattato, sebbene con diverse sfumature rispetto a quanto studiato in questa tesi, è di rilievo nel campo della ricerca del settore automotive. Ad esempio, i risultati trovati sono concordi con quanto evidenziato nell'articolo *"Electrification of the two-car household: PHEV or BEV? (2017) [28]"*. Esso sostiene che la soluzione migliore per l'utente può essere il BEV solo nel caso di un suo utilizzo ottimizzato e solo a patto che l'utente effettui la ricarica del veicolo che in Svezia è accessibile ad un costo inferiore rispetto allo scenario italiano, esclusivamente da casa, Qualora invece non si sia disposti ad accettare il limitato driving range dei veicoli puramente elettrici, allora il PHEV è sicuramente la soluzione migliore. Inoltre, se si prende in considerazione il caso di una famiglia con due auto, anche in termini di consumi di combustibile, il paper suggerisce come sia più conveniente, spesso, sostituire la prima vettura (quella con più chilometraggio annuale) con un modello PHEV, piuttosto che la seconda vettura (che fa meno chilometri) con un BEV.

L'importanza del costo della ricarica elettrica, più volte sottolineata, è stato il focus principale dell'articolo *"Comparison: Real World Cost of Fueling EVs and ICE Vehicles" (2021) [25]* che, dopo un'attenta analisi delle varie componenti di costo, osserva come la ricarica elettrica spesso sia più onerosa per l'utente rispetto al combustibile convenzionale. Questo è vero specialmente nel caso in cui l'utente non sia disposto ad effettuare una ricarica elettrica specialmente domestica.

Questa tesi, evidenziando i limiti dei BEVs, ipotizza diversi scenari in cui l'utente di un veicolo solo elettrico non sia in grado di soddisfare la ricarica solo grazie alla fornitura di energia elettrica domestica. Questo è coerente con quanto osservato nelle tesi*: "Scenari di ricarica di autoveicoli elettrici e impatti sul sistema energetico nazionale" (2018) [29]* e *"Il passaggio a soluzioni plug-in per autoveicoli in Piemonte: gli impatti sul sistema elettrico e sull'ambiente che ne derivano."(2021) [15]* che mostrano come, con il normale contratto elettrico domestico sia impossibile ricaricare completamente un BEV a

differenza di un PHEV che, avendo una batteria più piccola, rappresenta una soluzione più duttile.

Nel sottolineare i vantaggi di una motorizzazione PHEV rispetto alla BEV, quanto trovato ben si sposa con quanto descritto, con metodi statistici, nell'articolo *"ELECTRIC AND PLUG-IN HYBRID VEHICLE DEMAND: LESSONS FOR AN EMERGING MARKET" (2016) [30].* Infatti, secondo quanto riportato, una popolazione molto più ampia e generale sembra disposta a considerare l'acquisto di un PHEV piuttosto che di un BEV per sostituire il veicolo convenzionale.

Altri studi come: *"On Modeling the Cost of Ownership of Plug-In Vehicles" (2021) [9]*, analizzando il total cost of ownership dei BEVs e dei PHEVs, sono scettici sul raggiungimento del punto di pareggio tra questi veicoli ed i veicoli convenzionali. Tuttavia, i risultati dello studio sono in parte condizionati dal costo della benzina negli USA che, come noto, è sensibilmente inferiore a quello in Italia e nel resto d'Europa.

Uno focus sulla situazione italiana è prospettato da *"Automotive White Paper" (2021) [31]* che guarda con particolare interesse al suo comparto industriale. Il paper sostiene che, nel contesto di una filiera industriale estremamente frammentata e composta prevalentemente da PMI, il modello solo elettrico non sia realmente sostenibile nel breve. Ciò lo rende, per rispettare i target europei, necessariamente dipendente da continui finanziamenti statali. vista la limitata le capacità di investimento dei fornitori. Piuttosto che puntare sul solo elettrico il report vede favorevolmente, come soluzione, gli ibridi.

Infine, occorre citare studi come *"Comparative Life Cycle Energy and GHG Emission Analysis for BEVs and PhEVs: A Case Study in China*" (2019) *[32]* che, sebbene non trattino esplicitamente la tematica economica concernente le due tipologie di motorizzazioni, permettono di guardare più approfonditamente al tema delle emissioni nell'intero ciclo vita dei BEVs e PHEVs. Lo studio afferma che, se nell'intero ciclo vita del veicolo il PHEV emetta più CO_2 equivalente, è anche vero che la quota di anidride carbonica emessa dai BEV non sia affatto trascurabile, specialmente in fase di produzione del veicolo.

Tutti questi articoli suggeriscono come sia necessaria un'analisi costi benefici, tra PHEV e BEV, che tenga conto di tutti i fattori in gioco e non trascuri l'aspetto economico. Sulla base di questo principio è stato realizzato questo lavoro di tesi che, grazie ai risultati

prospettati, guarda più favorevolmente, allo stato attuale, ad una soluzione plug in hybrid piuttosto che ad una puramente elettrica.

15. Conclusioni

In questo lavoro di tesi, grazie ad un'attenta analisi della letteratura disponibile ed al software sperimentale HEVBox, è possibile analizzare l'attrattività economica dei veicoli ibridi plug-in e confrontarla con quella dei veicoli puramente elettrico.

Sulla base di quanto visto, si possono trarre le seguenti considerazioni:

- Le architetture PHEV non sono indifferenti ai costi energetici operativi e vi è un netto vantaggio per l'utente nell'acquistare un p4 rispetto ad un p2. Una soluzione interessante per quanto concerne i tratti autostradali è l'architettura p2p4; tuttavia, complessivamente il PHEV p4 è più conveniente economicamente anche di questa architettura complessa. È inoltre lecito supporre che avere due motori elettrici a bordo si rifletta negativamente sul prezzo di listino del veicolo.
- Su percorso urbano ed extraurbano la soluzione PHEV p4 è quella che ha le minori emissioni di anidride carbonica rispetto alle altre architetture ibride plug-in.
- Anche per gli ibridi plug-in il costo della ricarica elettrica è un parametro da dover considerare. Infatti, il break even point di 0,37 *[Euro/kWh]* in seno all'architettura p4 permette di concludere che, solo in caso di ricarica elettrica privata, il possessore di un PHEV può davvero trarre beneficio dalla doppia motorizzazione.
- Valutando i costi energetici operativi su base decennale, solo in caso di ricarica elettrica da casa il BEV è sempre superiore al PHEV in termini di costi. Tuttavia, da un lato più il BEV ha un'autonomia bassa più è limitante per l'utente dover ricaricare esclusivamente da casa in quanto lo preclude dal percorrere tragitti lunghi, dall'altro più il BEV ha un'autonomia alta (e quindi più consono ad una sola ricarica da casa) più il prezzo di listino sale.
- Considerando anche una percentuale minore del 50% di ricarica pubblica il PHEV p4 risulta più conveniente di molti BEV. Inoltre, viste le problematiche concernenti i tempi di ricarica, in caso di una ricarica al completamente pubblica, sebbene il BEV300 e BEV500 siano, da un punto di vista meramente economico,

migliori del PHEV p4, appare evidente come i veicoli BEV non siano indicati ad un utente che non disponga della possibilità di una percentuale significativa di ricarica privata. A rigor di logica, nemmeno un veicolo plug-in hybrid sarebbe consigliato in questo caso per quanto la doppia motorizzazione permetterebbe al veicolo di funzionare come un full-hybrid.

- Ricollegandosi al punto precedente, è bene osservare come, in uno scenario di ricarica completamente pubblica, al possessore del PHEV, economicamente parlando, converrebbe non ricaricare affatto il veicolo. In questo scenario, quindi, il PHEV p4 completamente scarico sarebbe addirittura più conveniente dei BEVs.
- Quest'analisi sui costi non tiene conto di fattori come la driver anxiety ed il tempo di ricarica. Sebbene siano fattori difficili da valutare, l'acquisto di un BEV non può prescindere da una loro valutazione. L'infrastruttura di ricarica è ancora troppo poco sviluppata per far sì che l'utente di un'auto puramente elettrica possa usare l'auto in tranquillità non preoccupandosi di dove e come effettuare la ricarica. Viceversa, il PHEV, avendo come motore principale quello endotermico non soffre di questi problemi.

Per concludere, questo lavoro di tesi evidenzia l'assoluta necessità, per effettuare la transizione tecnologica in atto in questi anni, di chiarezza e trasparenza per quanto riguarda il settore automotive. Piuttosto che promuovere esclusivamente le motorizzazioni puramente elettriche, facendo passare in secondo piano sia le emissioni di CO_2 da esse derivanti, sia ignorando le problematiche (economiche e quotidiane) cui l'utente dovrebbe far fronte acquistando questa tipologia di veicoli, sarebbe più opportuno incentivare il ricambio del parco circolante utilizzando tutto lo spettro tecnologicamente efficiente oggi disponibile. In un paese come l'Italia in cui circa il 20% delle auto è Euro 0-2 *[19]*, puntare solamente all'elettrico sembra poco perseguibile soprattutto in termini di costi per l'utente. D'altro canto, incentivare la sostituzione delle auto datate e poco efficienti con soluzioni più recenti ibride, convenzionali, a metano e in parte elettriche rappresenta, ad oggi, il compromesso migliore per salvaguardare l'ambiente senza mettere in secondo piano il benessere economico delle persone.

Indice tabelle

TABELLA 1: INCENTIVI TOTALI DISPONIBILI DAL GOVERNO ITALIANO TRAMITE IL DECRETO BILANCIO 2021 18
TABELLA 2: RISULTATI PER LA RICARICA NOTTURNA DOMESTICA A 2,3 KW IN RELAZIONE ALL'ENERGIA TOTALE CONTENUTA NELLA BATTERIA E ALL'ENERGIA NECESSARIA PER L'USO GIORNALIERO DEL VEICOLO. DA [15] 21
TABELLA 3: RISULTATI PER LA RICARICA NOTTURNA DOMESTICA A 3,7 KW IN RELAZIONE ALL'ENERGIA TOTALE CONTENUTA NELLA BATTERIA E ALL'ENERGIA NECESSARIA PER L'USO GIORNALIERO DEL VEICOLO. DA [15] 22
TABELLA 4: EMISSIONI DI CO2 PER DIVERSE TIPOLOGIE DI VEICOLO 29
TABELLA 5: DATI GENERICI DEL VEICOLO 34
TABELLA 6: DATI DEL MOTORE ENDOTERMICO 35
TABELLA 7: DATI DEL MOTORE ELETTRICO 35
TABELLA 8: DATI DELLA BATTERIA 35
TABELLA 9: DATI DELLA TRASMISSIONE 36
TABELLA 10: DATI DEL DIFFERENZIALE 36
TABELLA 11: CALCOLO DEI COSTI FISSI PER QUESTA TIPOLOGIA DI VEICOLO 40
TABELLA 12: CARATTERISTICHE DI ALCUNI IBRIDI PLUG-IN DISPONIBILI SUL MERCATO 43
TABELLA 13: CARATTERISTICHE DI ALCUNI BEV DISPONIBILI SUL MERCATO 44
TABELLA 14: CARATTERISTICHE DELLA PROCEDURA WLTC 47
TABELLA 15: CARATTERISTICHE DEL CICLO UEUC 48
TABELLA 16: CARATTERISTICHE CICLO GUIDA HIGHWAY 50
TABELLA 17: COSTI ENERGETICI 52
TABELLA 18: COSTO INTERVALLO RICARICA SU CICLO WLTC A SINGOLA PERCORRENZA 73
TABELLA 19: COSTO INTERVALLO RICARICA SU CICLO UEUC 77
TABELLA 20: COSTO INTERVALLO RICARICA SU CICLO HIGHWAY 80
TABELLA 21: DISTRIBUZIONE SCENARIO GUIDA 1 84
TABELLA 22: DISTRIBUZIONE SCENARIO GUIDA 2 85
TABELLA 23: DISTRIBUZIONE SCENARIO GUIDA 3 86
TABELLA 24: DISTRIBUZIONE SCENARIO DI GUIDA 4 87
TABELLA 25: CARATTERISTICHE DEI VEICOLI BEV UTILIZZATI 88
TABELLA 26: CARATTERISTICHE DI CONSUMO VEICOLO CICE UTILIZZATO 89
TABELLA 27: COSTI WALL BOX E COSTO ADEGUAMENTO IMPIANTO 95
TABELLA 28: COSTI MONETARI RICARICA ELETTRICA E COMBUSTIBILE TRADIZIONALE 104
TABELLA 29: COSTO RICARICA ELETTRICA IN UNO SCENARIO ESCLUSIVAMENTE DI RICARICA PUBBLICA 106

Indice figure

FIGURA 1: SCHEMA FUNZIONALE DI UN VEICOLO ELETTRICO 12
FIGURA 2: SCHEMA FUNZIONALE DI UN IBRIDO SERIE 13
FIGURA 3: SCHEMA FUNZIONALE DI UN IBRIDO PARALLELO 13
FIGURA 4: SCHEMA FUNZIONALE DI UN IBRIDO COMPLESSO 14
FIGURA 5: PROGRESSIVO VENDITE BEV E PHEV IN ITALIA (FONTE: ANALISI DI MERCATO MOTUS-E) 16
FIGURA 6: PERCENTUALE TIPOLOGIA DI VEICOLO RISPETTO AL PARCO CIRCOLANTE (FONTE: ANALISI DI MERCATO MOTUS-E) 16
FIGURA 7: PREVISIONE DEL COSTO DI RIFERIMENTO DELLE BATTERIE AL 2030 17
FIGURA 8: EVOLUZIONE INFRASTRUTTURA E PUNTI DI RICARICA PUBBLICI O ACCESSIBILI AL PUBBLICO IN ITALIA 19
FIGURA 9: DISTRIBUZIONE INFRASTRUTTURA E PUNTI DI RICARICA PUBBLICI O ACCESSIBILI AL PUBBLICO IN ITALIA 20
FIGURA 10: TECNOLOGIE DISPONIBILI PER LE BATTERIE NEL SETTORE AUTOMOTIVE 23
FIGURA 11: PESO DEL POWER-TRAIN E DELLA FONTE ENERGETICA RISPETTO AL RANGE SU CICLO NEDC 23
FIGURA 12: SCOSTAMENTO FUEL CONSUMPTION REALE PHEV RISPETTO A QUELLO CALCOLATO SU NEDC IN VARI PAESI 25
FIGURA 13: SCOSTAMENTO UF REALE PHEV RISPETTO A QUELLO CALCOLATO SU NEDC IN VARI PAESI 25
FIGURA 14: OFFICIAL VS REAL-WORLD EMISSION OF PLUG-IN HYBRIDS IN BASE ALLA MODALITÀ DI FUNZIONAMENTO 26
FIGURA 15: DAILY AVERAGE DISTANCES IN ITALY 27
FIGURA 16: CHILOMETRI ANNUALI PERCORRIBILI IN SOLO ELETTRICO PER LE VARIE TIPOLOGIE DI PHEV 27
FIGURA 17: CONFRONTO EMISSIONI DI CO2 DURANTE IL CICLO VITA PER UN VEICOLO BEV (MIX ENERGETICO EUROPEO) E UN VEICOLO CONVENZIONALE 29
FIGURA 18: RIPARTIZIONE DELLE TONNELLATE DI CO2 EQUIVALENTI PER LA VOLVO XC40 30
FIGURA 19: BREAK EVEN POINT DELLA CO2 EQUIVALENTE PER LA VOLVO XC40 30
FIGURA 20: SCHEMA FUNZIONALE ARCHITETTURA PHEV P2 31
FIGURA 21: MERCEDES A250E (IBRIDA PLUG-IN CON ARCHITETTURA P2) 31
FIGURA 22: SCHEMA FUNZIONALE ARCHITETTURA PHEV P4 32
FIGURA 23: JEEP COMPASS 4XE (IBRIDA PLUG-IN CON ARCHITETTURA P4) 32
FIGURA 24: SCHEMA FUNZIONALE ARCHITETTURA PHEV P2P4 33
FIGURA 25: SUZUKI ACROSS (IBRIDA PLUG-IN CON ARCHITETTURA P2P4) 33
FIGURA 26: SOFTWARE HEVBOX 37
FIGURA 27: COSTO TOTALE DI PRODUZIONE 41
FIGURA 28: PERCENTUALE COSTI TOTALI DI PRODUZIONE 41
FIGURA 29: COSTO TOTALE INIZIALE 42
FIGURA 30: COSTO DI ALCUNI IBRIDI PLUG-IN DISPONIBILI SUL MERCATO 43
FIGURA 31: COSTO DI ALCUNI BEV DISPONIBILI SUL MERCATO 43
FIGURA 32: CICLO GUIDA WLTC 47
FIGURA 33: CICLO GUIDA UEUC 49
FIGURA 34: CICLO GUIDA HIGHWAY 50
FIGURA 35: COSTI ENERGETICI IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO PHEV P2 SU WLTC A SINGOLA PERCORRENZA 55
FIGURA 36: COSTI ENERGETICI IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO PHEV P4 SU WLTC A SINGOLA PERCORRENZA 55
FIGURA 37: COSTI ENERGETICI IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO PHEV P2P4 SU WLTC A SINGOLA PERCORRENZA 55
FIGURA 38: COSTO TOTALE IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO DI PHEV TOTALE IN P2 SU WLTC A SINGOLA PERCORRENZA 56
FIGURA 39: COSTO TOTALE IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO DI PHEV TOTALE IN P4 SU WLTC A SINGOLA PERCORRENZA 56

FIGURA 40: COSTO TOTALE IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO DI PHEV TOTALE IN P2P4 SU WLTC A SINGOLA PERCORRENZA 56
FIGURA 41: MAPPA WLTC A SINGOLA PERCORRENZA PHEV P2 S.O.C 70% 57
FIGURA 42: MAPPA WLTC A SINGOLA PERCORRENZA PHEV P2 S.O.C 35% 57
FIGURA 43: MAPPA WLTC A SINGOLA PERCORRENZA PHEV P2 S.O.C 10% 57
FIGURA 44: MAPPA WLTC A SINGOLA PERCORRENZA PHEV P4 S.O.C 70% 57
FIGURA 45: MAPPA WLTC A SINGOLA PERCORRENZA PHEV P4 S.O.C 35% 58
FIGURA 46: MAPPA WLTC A SINGOLA PERCORRENZA PHEV P4 S.O.C 10% 58
FIGURA 47: MAPPA WLTC A SINGOLA PERCORRENZA PHEV P2P4 S.O.C 70% 58
FIGURA 48: MAPPA WLTC A SINGOLA PERCORRENZA PHEV P2P4 S.O.C 35% 58
FIGURA 49: MAPPA WLTC A SINGOLA PERCORRENZA PHEV P2P4 S.O.C 10% 59
FIGURA 50: COSTI ENERGETICI IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO DI PHEV P2 SU CICLO GUIDA UEUC 60
FIGURA 51: COSTI ENERGETICI IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO DI PHEV P4 SU CICLO GUIDA UEUC 60
FIGURA 52: COSTI ENERGETICI IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO DI PHEV P2P4 SU CICLO GUIDA UEUC 60
FIGURA 53: COSTO TOTALE IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO DI PHEV P2 SU CICLO GUIDA UEUC 61
FIGURA 54: COSTO TOTALE IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO DI PHEV P4 SU CICLO GUIDA UEUC 61
FIGURA 55: COSTO TOTALE IN FUNZIONE DI SOC DI PARTENZA, IN CASO DI PHEV P2P4 SU CICLO GUIDA UEUC 61
FIGURA 56: MAPPA UEUC PHEV P2 S.O.C 95% 62
FIGURA 57: MAPPA UEUC PHEV P2 S.O.C 35% 62
FIGURA 58: MAPPA UEUC PHEV P2 S.O.C 10% 62
FIGURA 59: MAPPA UEUC PHEV P4 S.O.C 95% 62
FIGURA 60: MAPPA UEUC PHEV P4 S.O.C 35% 63
FIGURA 61: MAPPA UEUC PHEV P4 S.O.C 10% 63
FIGURA 62: MAPPA UEUC PHEV P2P4 S.O.C 95% 63
FIGURA 63: MAPPA UEUC PHEV P2P4 S.O.C 35% 63
FIGURA 64: MAPPA UEUC PHEV P2P4 S.O.C 10% 64
FIGURA 65: COSTI ENERGETICI IN FUNZIONE DI SOC, IN CASO DI PHEV P2 SU CICLO GUIDA HIGHWAY 65
FIGURA 66: COSTI ENERGETICI IN FUNZIONE DI SOC, IN CASO DI PHEV P4 SU CICLO GUIDA HIGHWAY 65
FIGURA 67: COSTI ENERGETICI IN FUNZIONE DI SOC, IN CASO DI PHEV P2P4 SU CICLO GUIDA HIGHWAY 65
FIGURA 68: COSTI ENERGETICI TOTALI IN FUNZIONE DI SOC, IN CASO DI PHEV P2 SU CICLO GUIDA HIGHWAY 66
FIGURA 69: COSTI ENERGETICI TOTALI IN FUNZIONE DI SOC, IN CASO DI PHEV P4 SU CICLO GUIDA HIGHWAY 66
FIGURA 70: COSTI ENERGETICI TOTALI IN FUNZIONE DI SOC, IN CASO DI PHEV P2P4 SU CICLO GUIDA HIGHWAY 66
FIGURA 71: MAPPA HIGHWAY PHEV P2 S.O.C 70% 67
FIGURA 72: MAPPA HIGHWAY PHEV P4 S.O.C 70% 67
FIGURA 73: MAPPA HIGHWAY PHEV P2P4 S.O.C 70% 67
FIGURA 74: CONFRONTO COSTI ENERGETICI TOTALI TRA ARCHITETTURA P2, P4 E P2P4 IN FUNZIONE DELLO SOC DI PARTENZA IN CASO DI WLTC A SINGOLA PERCORRENZA 71
FIGURA 75: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2 S.O.C 95% 71
FIGURA 76: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P4 S.O.C 95% 71
FIGURA 77: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2P4 S.O.C 95% 71
FIGURA 78: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2P4 S.O.C 95% 71
FIGURA 79: MAPPA MOT TERMICO PHEV P4 S.O.C 95% 71
FIGURA 80: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2 S.O.C 95% 71
FIGURA 81 MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P4 S.O.C 35% 71
FIGURA 82: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2 S.O.C 35% 71
FIGURA 83: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2P4 S.O.C 35% 71
FIGURA 84: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2 S.O.C 35% 72
FIGURA 85: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2P4 S.O.C 35% 72
FIGURA 86: MAPPA MOT TERMICO PHEV P4 S.O.C 35% 72
FIGURA 87: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2 S.O.C 10% 72
FIGURA 88: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P4 S.O.C 10% 72
FIGURA 89: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2P4 S.O.C 10% 72
FIGURA 90: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2 S.O.C 10% 72

FIGURA 91: MAPPA MOT TERMICO PHEV P4 S.O.C 10% 72
FIGURA 92: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2P4 S.O.C 10% 72
FIGURA 93: EMISSIONI DI CO2 AL VARIARE DELLO SOC, SU CICLO GUIDA WLTC A SINGOLA PERCORRENZA 72
FIGURA 94: SOC INIZIALI E FINALI SU CICLO GUIDA WLTC A SINGOLA PERCORRENZA 73
FIGURA 95: COSTO MEDIO SU WLTC A SINGOLA PERCORRENZA 73
FIGURA 96: CONFRONTO COSTI ENERGETICI TOTALI TRA ARCHITETTURA P2, P4 E P2P4 IN FUNZIONE DELLO SOC DI PARTENZA IN CASO DI CICLO UEUC 75
FIGURA 97: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2P4 S.O.C 95% 75
FIGURA 98: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P4 S.O.C 95% 75
FIGURA 99: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2 S.O.C 95% 75
FIGURA 100: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2P4 S.O.C 95% 75
FIGURA 101: MAPPA MOT TERMICO PHEV P4 S.O.C 95% 75
FIGURA 102: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2 S.O.C 95% 75
FIGURA 103: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2 S.O.C 35% 75
FIGURA 104: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P4 S.O.C 35% 75
FIGURA 105: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2P4 S.O.C 35% 75
FIGURA 106: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2 S.O.C 35% 76
FIGURA 107: MAPPA MOT TERMICO PHEV P4 S.O.C 35% 76
FIGURA 108: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2P4 S.O.C 35% 76
FIGURA 109: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2P4 S.O.C 10% 76
FIGURA 110: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P4 S.O.C 10% 76
FIGURA 111: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2 S.O.C 10% 76
FIGURA 112: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2P4 S.O.C 10% 76
FIGURA 113: MAPPA MOT TERMICO PHEV P4 S.O.C 10% 76
FIGURA 114: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2 S.O.C 10% 76
FIGURA 115: EMISSIONI DI CO2 AL VARIARE DELLO SOC, SU CICLO GUIDA UEUC 76
FIGURA 116: SOC INIZIALI E FINALI SU CICLO GUIDA UEUC 77
FIGURA 117: COSTO MEDIO SU UEUC 77
FIGURA 118: CONFRONTO COSTI ENERGETICI TOTALI TRA ARCHITETTURA P2, P4 E P2P4 IN FUNZIONE DELLO SOC DI PARTENZA IN CASO DI CICLO HIGHWAY 79
FIGURA 119: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2P4 S.O.C 70% 79
FIGURA 120: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P4 S.O.C 70% 79
FIGURA 121: MAPPA MOT ELETTRICO PHEV P2 S.O.C 70% 79
FIGURA 122: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2P4 S.O.C 70% 79
FIGURA 123: MAPPA MOT TERMICO PHEV P4 S.O.C 70% 79
FIGURA 124: MAPPA MOT TERMICO PHEV P2 S.O.C 70% 79
FIGURA 125: EMISSIONI DI CO2 AL VARIARE DELLO SOC, SU CICLO GUIDA HIGHWAY A SINGOLA PERCORRENZA 80
FIGURA 126: COSTO MEDIO SU HIGHWAY 80
FIGURA 127: BREAK EVEN POINT DELLA RICARICA ELETTRICA, PER UN PHEV P4 SU CICLO UEUC 82
FIGURA 128: COSTI DELL'ENERGIA ELETTRICA AL KWH NEI DIVERSI PAESI EUROPEI 82
FIGURA 129: SCENARIO GUIDA UNO 84
FIGURA 130: SCENARIO DI GUIDA DUE 85
FIGURA 131: SCENARIO DI GUIDA TRE 86
FIGURA 132: SCENARIO DI GUIDA QUATTRO 87
FIGURA 133: COSTI ENERGETICI ANNUALI SCENARIO DI GUIDA 1 (RICARICA ELETTRICA DA CASA) 90
FIGURA 134: COSTI ENERGETICI ANNUALI SCENARIO DI GUIDA 2 (RICARICA ELETTRICA DA CASA) 91
FIGURA 135: COSTI ENERGETICI ANNUALI SCENARIO DI GUIDA 3 (RICARICA ELETTRICA DA CASA) 92
FIGURA 136: COSTI ENERGETICI ANNUALI SCENARIO DI GUIDA 4 (RICARICA ELETTRICA DA CASA) 93
FIGURA 137: COSTI ENERGETICI ANNUALI SCENARIO DI GUIDA 1 (SE RICARICA ELETTRICA È 70% DA CASA E 30% PUBBLICA) 96
FIGURA 138: COSTI ENERGETICI ANNUALI SCENARIO DI GUIDA 2 (SE RICARICA ELETTRICA È 70% DA CASA E 30% PUBBLICA) 97

FIGURA 139: COSTI ENERGETICI ANNUALI SCENARIO DI GUIDA 3 (SE RICARICA ELETTRICA È 70% DA CASA E 30% PUBBLICA) 98
FIGURA 140: COSTI ENERGETICI ANNUALI SCENARIO DI GUIDA 4 (SE RICARICA ELETTRICA È 70% DA CASA E 30% PUBBLICA) 99
FIGURA 141: DIRECT MONETARY COST OF FUELING ICE AND EV'S AS OF MID 2021 102
FIGURA 142: COMPOSITION OF DIRECT MONETARY COSTS 103
FIGURA 143: RAPPORTO ABITANTI-GARAGE IN METROPOLI E CITTÀ MINORI 105
FIGURA 144: DISTRIBUZIONE DELLA PERCENTUALE DI GARAGE PER IMMOBILE 105
FIGURA 145: TCO SCENARIO 1 107
FIGURA 146: TCO SCENARIO 2 108
FIGURA 147: TCO SCENARIO 3 108
FIGURA 148: TCO SCENARIO 4 108
FIGURA 149: TCO DELLE DIVERSE MOTORIZZAZIONI 109
FIGURA 150 BREAK EVEN POINT DELLA RICARICA ELETTRICA PER DIVERSE SOLUZIONI BEV 110

Bibliografia

[1] COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO, AL CONSIGLIO, AL COMITATO ECONOMICO E SOCIALE EUROPEO E AL COMITATO DELLE REGIONI: Il Green Deal europeo; Bruxelles, 11/12/2019.

[2] Air Quality in Europe – 2015; European Environment Agency, 2015.

[3] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS: 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality: Brussels, 14/7/2021.

[4] Legge di bilancio dicembre 2018 n°145: Bilancio di previsione dello Stato per l'anno finanziario 2019 e bilancio pluriennale per il triennio 2019-2021; Roma 31/12/2018.

[5] Legge di bilancio dicembre 2020 n°178: Bilancio di previsione dello Stato per l'anno finanziario 2021 e bilancio pluriennale per il triennio 2021-2023; Roma 30/12/2020.

[6] Studio sul raggiungimento degli obiettivi specifici sulle emissioni di CO_2 per un autoveicolo ibrido plug-in con simulazione di cigli di guida reali; Marcello Marabete 2021.

[7] Analisi di mercato mensili; Motus-e 2019-2021.

[8] Large-scale automotive battery cell manufacturing: Analyzing strategic and operational effects on manufacturing costs; Fabian Duffner, Lukas Mauler, Marc Wentker, Jens Leker, Martin Winter, 2021.

[9] On Modeling the Cost of Ownership of Plug-In Vehicles; Karim Hamza, Kenneth P. Laberteaux, Kang-Ching Chu, 2021.

[10] Do policy mix charateristics matter for electric vehicle adoptin? A survey-based exploration; Lixu Li, Zhiqiang Wang, Qiang Wang, agosto 2020.

[11] Understanding the impact of reocurring and non-financial incentives on plug-in electric vehicle adoption – a review 2019; Scott Hardman, 2019.

[12] Le infrastrutture di ricarica pubbliche in Italia; Motus-e, 2020.

[13] Evaluating the effectiveness of electric vehicle subsidies in Canada; Zachary Thorne, Larry Hughes, 2019.

[14] Understanding discontinuance among California'selectric vehicle owners; Scott Hardman, Gil Tal, 2021.

[15] Il passaggio a soluzioni plug-in per autoveicoli in Piemonte: gli impatti sul sistema elettrico e sull'ambiente che ne derivano; Alberto Dusnasio, 2021.

[16] REAL-WORLD USAGE OF PLUG-IN HYBRID ELECTRIC VEHICLES FUEL CONSUMPTION, ELECTRIC DRIVING, AND CO2 EMISSIONS; Patrick Plötz, Cornelius Moll, Georg Bieker, Peter Mock, Yaoming Li, settembre 2020.

[17] Plug-in hybrids: Is Europe heading for a new dieselgate?; Transport & Environment, novembre 2021.

[18] Perspectives on Electrification for the Automotive Sector: A Critical Review of Average Daily Distances by Light-Duty Vehicles, Required Range, and Economic Outcomes; Bruno Dalla Chiara, Francesco Deflorio, Michela Pellicelli, Luca Castello and Marco Eid, ottobre 2019.

[19] IL RINNOVO DEL PARCO VEICOLARE ITALIANO PER UNA MOBILITÀ PIÙ SICURA, EQUA E SOSTENIBILE; Fondazione Filippo Caracciolo, 2021.

[20] Carbon footprint report Volvo C40 Recharge; Volvo, 2021.

[21] Update on electric vehicle costs in the United States through 2030; Nic Lutsey and Michael Nicholas, 2019.

[22] Electric Vehicle Teardown; Patrick Humme, David Lesne, Julian Radlinger, Chervine Golbaz, Colin Langan, Kohei Takahashi, David Mulholland, Andrew Stott, Geoff Haire, Markus Mittermaier, Nicolas Gaudois, Lachlan Shaw, 2017.

[23] Migration of road transport towards hybrid powertrain solution; Gerard Illana Meler, 2016.

[24] il futuro della mobilità elettrica: l'infrastruttura di ricarica in Italia @2030; Motus-e, ottobre 2020.

[25] Comparison: Real World Cost of Fueling EVs and ICE Vehicles; Patrick L. Anderson, Alston D'Souza, 2021.

[26] Car Cost Index 2021; LeasePlan, 2021.

[27] Auto più vendute nel 2020, i dati di un mercato in crisi; NewsAuto, 2020.

[28] Electrification of the two-car household: PHEV or BEV?; Lars-HenrikBjörnsson StenKarlsson, 2017.

[29] Scenari di ricarica di autoveicoli elettrici e impatti sul sistema energetico nazionale; Minetti Alessandro, 2018.

[30] ELECTRIC AND PLUG-IN HYBRID VEHICLE DEMAND: LESSONS FOR AN EMERGING MARKET; Tamara L. Sheldon, J. R. DeShazo, Richard T. Carson, 2016.

[31] Automotive White Paper; Deloitte, 2021.

[32] Comparative Life Cycle Energy and GHG Emission Analysis for BEVs and PhEVs: A Case Study in China; Siqin Xiong, Junping Ji, and Xiaoming Ma, 2019.