POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Effetti dell'ibridizzazione del parco autoveicolare, analisi delle performance di veicoli plug-in e potenziali sviluppi della mobilità motorizzata urbana



Relatore

prof. Ing. Bruno DALLA CHIARA

Candidato

Elio Romano

Indice

Introduzione	4
Capitolo I Emissioni e qualità dell'aria	5
1.1 Il contributo dei trasporti	5
1.2 Emissioni di CO ₂ ed energia elettrica	8
1.3 Motori a combustione interna e relative emissioni	9
1.3.1 Motori Diesel	10
1.3.2 Motori a Benzina.	12
1.3.3 Metano	13
1.4 Strategie e obiettivi futuri	13
Capitolo II Elettrificazione del parco auto	15
2.1 Processo di elettrificazione.	16
2.1.1 Micro HEV (Micro Hybrid Electric Vehicle)	17
2.1.2 MHEV (Mild Hybrid Electric Vehicle)	18
2.1.3 HEV (Hybrid Electric Vehicle)	19
2.1.3.1 Ibrido parallelo	19
2.1.3.2 Ibrido Serie	19
2.1.3.3 Ibrido misto (serie-parallelo)	21
2.1.4 PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	22
2.1.5 BEV (Battery Electric Vehicle)	23
2.1.6 FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)	23
Capitolo III Stato dell'arte	24
3.1 Stato dell'arte generale	24
3.2 Stato dell'arte su analisi dei consumi energetici di auto ibride Plug-in	25
3.2.1 Emissioni globali di CO ₂	29
3.2.2 Impatto sulla rete elettrica	30
3.2.3 Costi delle auto ibride	30

Capitolo IV Le performance delle auto PHEV e il confronto con	le auto
tradizionali	32
4.1 Batterie per auto PHEV.	32
4.2 Sistemi e modi di ricarica	35
4.3 Fabbisogno energetico e tempistiche di ricarica	36
4.4 Motori Elettrici per PHEV	39
4.5 Fattori che influiscono sull'autonomia	39
4.5.1 Massa	41
4.5.2 Modalità di Trazione.	42
4.5.3 Temperatura esterna e condizionamento dell'aria	43
4.5.4 Percorsi e condizioni del traffico	45
4.5.5 Pendenza.	46
4.6 Valutazione delle performance di un'auto PHEV	46
4.6.1 Percorso misto Urbano + extraurbano	47
4.6.2 Valutazione economica delle performance	50
4.6.3 Confronto su percorso misto	51
4.7 Percorso Urbano	53
Capitolo V Prospettive future sul contributo delle auto PH	EV alla
mobilità urbana	55
5.1 Contributo del traffico all'inquinamento del centro città	55
5.1.1 Ottimizzazione dell'architettura PHEV al traffico urb	ano60
5.1.2 Controllo degli ingressi alle ZTL	60
5.1.3 Introduzione del limite a 30 km/h nelle zone ZTL	62
5.1.4 Car Sharing e car pooling	63
Conclusioni	65
Riferimenti bibliografici	69

Introduzione

Tra i Paesi dell'Unione Europea l'Italia è quello con il più alto indice di auto per abitante, pari a 0,63 auto per ogni abitante [1].

Il contributo delle automobili ha un duplice impatto a livello ambientale: a livello locale l'inquinamento causato dalle attività antropiche, tra cui il traffico motorizzato, sta diventando un problema sempre più sentito soprattutto nei centri urbani, tanto che in tutta Europa sono disposte limitazioni del traffico con l'obiettivo di ridurre la presenza di gas inquinanti e migliorare la qualità dell'aria.

A livello mondiale invece, i consumi energetici e di carburante, contribuiscono all'emissione di gas serra nell'atmosfera, in particolare di CO₂, che contribuisce al surriscaldamento globale e, nonostante l'impegno da parte delle nazioni a ridurre i consumi energetici e ad adottare politiche di "decarbonizzazione", i valori di questo gas sono sempre troppo elevati.

Tanti sono gli attori coinvolti nel processo di miglioramento della qualità dell'aria ma il settore dei trasporti è sicuramente tra i protagonisti.

Una delle strade che le case automobilistiche stanno percorrendo per ridurre emissioni e consumi è quella di elettrificare la flotta, cercando di risolvere i problemi legati alla sicurezza, all'autonomia e ai costi, i quali rendono le auto elettriche ancora poco appetibili ai consumatori. In questo lavoro di tesi, dopo una breve panoramica sulle problematiche relative alla qualità dell'aria e al contributo ambientale delle auto tradizionali, verrà analizzato in breve il processo di evoluzione che porta un'auto tradizionale a diventare elettrica con particolare attenzione alle vetture ibride Plug-in.

A seguire verrà riportato lo stato dell'arte relativo ad alcuni studi sulle auto ibride plug-in.

Il lavoro di tesi procede con un caso di studio condotto con prove reali effettuate utilizzando un'auto ibrida plug-in su due tipi di percorso, misto e urbano, analizzando nel dettaglio le performance della vettura.

Nella parte finale, utilizzando sia i dati relativi a studi condotti sul contributo del traffico motorizzato all'inquinamento dei centri urbani, sia i dati ricavati dalle prove reali, verranno analizzati i potenziali contributi delle auto PHEV alla riduzione delle polveri sottili e delle sostanze inquinanti, indicando quali misure sono necessarie per sfruttare a pieno i benefici di queste auto nelle aree del centro urbano.

L'obiettivo dello studio è quello di valutare le performance delle auto ibride plug-in e capire se hanno realmente le potenzialità per limitare l'inquinamento dei centri urbani.

Capitolo I

Emissioni e qualità dell'aria

1.1 Il contributo dei trasporti

Il problema delle emissioni dei mezzi di trasporto è da anni al centro dell'attenzione a livello internazionale. Gli effetti dell'inquinamento causato dai trasporti si ripercuotono sia a livello locale sulla qualità dell'aria che respiriamo, sia a livello globale sulle emissioni di gas serra nell'atmosfera le quali contribuiscono al surriscaldamento globale.

In questo studio verranno considerate esclusivamente le automobili in quanto nella categoria del trasporto passeggeri corrispondono al 74,3% della ripartizione modale passeggeri/km, le restanti quote sono dell'11,9% per il trasporto su autobus e dell'8,8% per il trasporto su ferro [2].

Inoltre dai dati pubblicati dall'Arpa per il Piemonte possiamo vedere come, considerando esclusivamente i trasporti, le automobili siano le principali fonti di polveri sottili (figura 1.1).

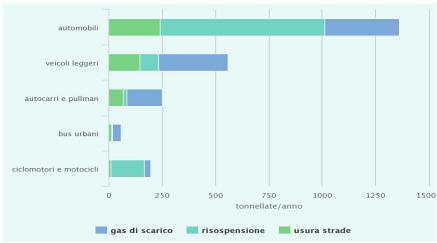


Figura 1.1: emissioni regionali di PM10 da traffico urbano. Fonte Arpa Piemonte

I valori riportati in figura 1.1 sono dei valori puramente indicativi in quanto non è semplice stabilire a livello quantitativo il contributo effettivo del traffico urbano sulla qualità dell'aria. Questo perché le variabili in gioco sono molteplici e non sempre facilmente individuabili. Basti pensare che il particolato in sospensione nell'aria può avere molteplici origini:

- combustione degli idrocarburi, (non solo da parte dei mezzi di trasporto ma anche delle caldaie di riscaldamento, forni, caminetti, stufe etc.);
- usura degli pneumatici;
- ferodo delle pastiglie dei freni a disco;
- mancata pulizia delle strade, specialmente durante periodi di prolungata siccità, che

facilità la sospensione del pulviscolo nell'aria.

Per quanto riguarda le emissioni di gas serra, i trasporti sono uno dei settori maggiormente responsabili con circa il 25% del totale.

	2010	2012	2013	2014	2015
Passeggeri	64,4	62,2	62,8	63,3	63,6
Merci	35,2	36,7	36,9	36,1	35,9
Altro (P.A., nautica)	0,4	1,2	0,3	0,5	0,5
TOTALE	100	100	100		100
Trasporto stradale	93,0	92,1	93,3	93,7	93,2
Altre modalità	7,0	7,9	6,7	6,3	6,8
TOTALE	100	100	100	100	100

Tabella 1.1: Emissioni di CO2 per tipo di traffico e modalità di trasporto. Fonte: Elaborazione ISPRA su dati MIT

La CO₂ costituisce il 98,9% delle emissioni di Gas serra e la strada contribuisce in modo preponderante alle emissioni di CO₂, con il 93,2% del totale. La fonte principale di emissioni è la mobilità di merci e passeggeri per il trasporto su strada [2].

Le nuove tecnologie e le normative introdotte negli ultimi decenni hanno permesso di ottenere i primi risultati tangibili, tanto che si è rilevata negli ultimi anni una diminuzione delle emissioni di inquinanti atmosferici prodotte dal trasporto stradale. Ad esempio, tra il 1990 ed il 2014 le emissioni di ossidi di azoto sono diminuite del 53% e quelle di particolato primario (PM2.5) sono diminuite del 57% [2].

Anche dal rapporto dell'Arpa sulla qualità dell'aria è possibile vedere come il livello medio delle polveri sottili (PM10) nel corso degli anni ha subito una riduzione sostanziale (Fig. 1.2).

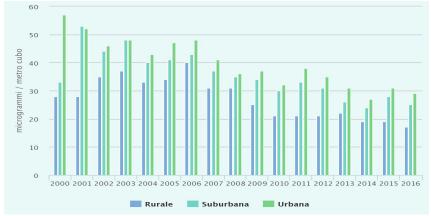


Figura 1.2: PM10 andamento della media annua; Fonte: Arpa Piemonte

Le misure adottate per abbattere le sostanze inquinanti citate precedentemente si sono dimostrate efficaci ma non sufficienti, in quanto la qualità dell'aria nelle grandi aree urbane non rispetta in

molti casi i valori limite stabiliti dalla normativa europea.

Il valore limite giornaliero per la protezione della salute umana è pari a 50 μ g/m3, da non superare più di 35 volte per anno [3].

Il Piemonte purtroppo presenta una delle situazioni più critiche dove questa soglia viene costantemente superata.

Nella figura 1.3 è riportato il valore medio di superamenti calcolato per ogni tipo di zona (rurale, suburbana e urbana).

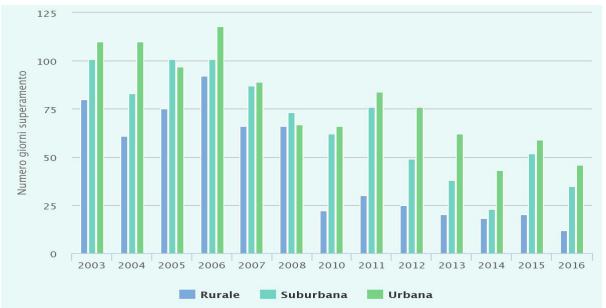


Figura 1.3: valore medio di superamenti su base regionale. Fonte Arpa Piemonte

Come si vede dal grafico in figura 1.3 l'andamento generale rivela una progressiva diminuzione, che però nel caso urbano rimane ben al di sopra del limite dei 35 giorni.

Gli attori coinvolti nel processo di riduzione delle emissioni e dei consumi energetici sono tanti e ognuno ha un impegno da rispettare per raggiungere gli obiettivi prefissati dalla comunità internazionale.

Tra le soluzioni proposte dalle case automobilistiche spicca sicuramente il tentativo di elettrificazione del parco auto al quale stiamo assistendo negli ultimi anni.

In questo studio verranno analizzati gli effetti del processo di elettrificazione che, come vedremo nei capitoli successivi, prevede diversi step di integrazione ognuno dei quali ha un diverso impatto sulla riduzione delle emissioni.

Uno degli obiettivi di questo studio è quello di quantificare i benefici del processo di elettrificazione analizzando nel dettaglio i consumi energetici e le emissioni con particolare attenzione alle auto ibride plug-in.

Al fine di rendere la trattazione più chiara possibile sono stati considerati nei prossimi paragrafi i fattori che interessano gli argomenti trattati nello studio, in particolare parleremo di benzina e gasolio in quanto sono i combustibili più diffusi nelle automobili attualmente circolanti (figura 1.4), e di metano, il quale oltre ad essere utilizzato come combustibile per autotrazione, corrisponde al vettore principale per la produzione di energia elettrica in Italia pari a circa il 60% [4].

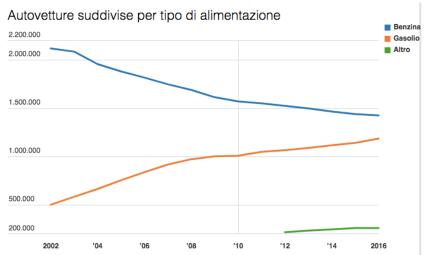


Figura 1.4: Parco auto circolante dal 2002 al 2016 in Piemonte suddiviso per alimentazione. Fonte: ACI

1.2 Emissioni di CO₂ ed energia elettrica.

Le case automobilistiche, in riferimento alle auto tradizionali, dichiarano emissioni di CO₂ che tengono conto esclusivamente del "Tank to wheel" e non considerano quindi i consumi energetici legati alla distillazione e al trasporto dei prodotti petroliferi.

Allo stesso modo nel calcolo delle emissioni di un'auto ibrida/elettrica non si tiene conto della quota dei consumi per la produzione dell'energia necessaria all'alimentazione delle vetture. Questo tipo di approccio permette alle cause automobilistiche di dichiarare valori di emissione di CO₂ nettamente inferiori ai valori reali (in diversi casi pari allo 0), fatta eccezione ovviamente per il contributo a livello locale dei motori a combustione interna. Con questo tipo di approccio ad esempio le auto puramente elettriche risultano avere emissioni pari a 0.

In questa trattazione per poter paragonare al meglio le diverse tecnologie, verrà considerato l'indice "well to wheel", un indicatore usato per analisi energetiche che tiene conto di tutto il processo dall'estrazione alla distribuzione.

Verranno considerate quindi anche le emissioni di CO₂ derivanti dal mix produttivo di energia elettrica in Italia facendo riferimento ai dati forniti da Terna nel rapporto "statistiche regionali 2016" riportate in figura 1.5.

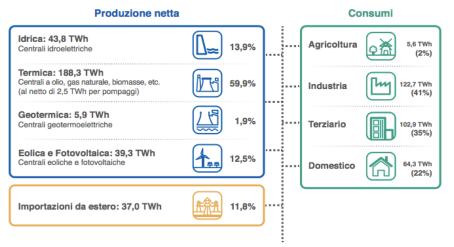


Figura 1.5: Capacità produttiva di energia elettrica divisa per fonte al 2016. Fonte: Terna

In base alle informazioni fornite da Terna è stata quindi considerata la produzione di energia elettrica a livello nazionale attribuendo ad ogni fonte di energia elettrica un valore di CO₂ equivalente, calcolata considerando i valori pubblicati nel 2014 dal gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici riportati in Tabella 1.2 [5].

Non essendoci stata una versione aggiornata del documento, questi valori sono tutt'ora utilizzati come riferimento nelle analisi delle emissioni di CO₂ equivalenti.

Fonte	CO ₂ eq
Idroelettrica	24g/kWh
Termica (gas naturale, prodotti del petrolio e biomasse)	500g/kWh
Geotermica	38g/kWh
Eolica e fotovoltaica	30g/kWh
Totale	430g/kWh

Tabella 1.2: valori di CO2 equivalenti per kWh prodotti. Fonte IPCC 2014

1.3 Motori a combustione interna e relative emissioni

I motori a combustione interna convertono l'energia chimica contenuta nel carburante in energia meccanica e si dividono in:

- motori ad accensione spontanea che seguono un ciclo diesel e che chiameremo motori diesel;
- motori ad accensione comandata che seguono il ciclo otto che indicheremo come motori

a benzina.

In un motore a combustione interna le emissioni sono costituite da numerose sostanze, il 99% del totale è costituito da azoto (N), acqua (H₂O), monossido di carbonio (CO), anidride carbonica (CO₂), ossigeno (O₂) e idrogeno (H). Le sole sostanze ritenute inquinanti e soggette a regolamentazione sono il monossido di carbonio (CO), gli idrocarburi incombusti (HC), e gli ossidi di azoto (NOx). Inquinanti sono pure considerati i composti di piombo e dello zolfo derivanti dalla combustione dei carburanti.

Se il CO, gli HC e gli NOx sono prodotti tipici della combustione, la presenza del piombo nei gas di scarico è dovuta ad una intenzionale aggiunta al carburante. La presenza di zolfo è dovuta alle impurità contenute nel petrolio grezzo, pertanto occorre sottoporre i derivati tra cui il gasolio a interventi di desolforazione.

Per quanto riguarda la pericolosità delle sostanze inquinanti per la salute dell'uomo:

- Il monossido di carbonio è un gas velenoso perché essendo affine all'emoglobina contenuta nel sangue si compone con essa dando luogo alla formazione di carbossiemoglobina. Se la concentrazione di questo composto nel sangue supera il 40% interviene nell'organismo umano il decesso per asfissia.
- Gli idrocarburi incombusti sono sostanze tossiche, inoltre i composti della serie aromatica policiclica sono sospettati di essere cancerogeni e quando questi si trovano in presenza degli NOx, causano irritazione delle vie respiratorie.
- Gli ossidi di azoto NOx, danno luogo in particolari condizioni alla formazione di acido nitrico oltre ad essere essi stessi tossici per il sangue.

1.3.1 Motori Diesel

I motori diesel sono tra i motori a combustione interna quelli che incidono maggiormente sulle emissioni di sostanze nocive.

Essi sfruttano l'aumento della temperatura dell'aria dovuto alla compressione, mediante un cilindro, nella camera di combustione.

Una volta che il cilindro è arrivato nei pressi del punto morto superiore avviene l'iniezione del gasolio il quale detona a contatto con l'aria ad elevata temperatura. I gas sviluppati dalla combustione generano una spinta sul pistone che si trasforma in energia meccanica grazie all'albero motore e a un sistema biella-manovella collegato al pistone.

Il processo viene comandato da una serie di valvole che permettono l'ingresso dell'aria e l'uscita dei gas di scarico dalla camera di combustione.

In figura 1.6 è possibile vedere le fasi caratteristiche di questo motore.

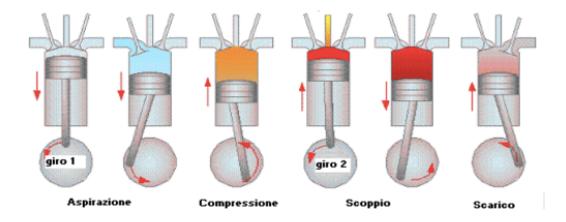


Figura 1.6 fasi caratteristiche del motore Diesel.

Il problema principale per i motori diesel è quello delle emissioni, tanto che i costruttori sono costantemente impegnati a studiare e a proporre soluzioni sempre più efficienti e meno inquinanti ma non sempre efficaci.

I provvedimenti che prevedono limitazioni del traffico infatti hanno sempre più spesso come protagonisti i motori diesel a volte anche di ultima generazione.

Il combustibile utilizzato per alimentare i motori diesel è il gasolio.

Il gasolio è uno dei prodotti del petrolio che si ottiene nella torre di frazionamento, esso contiene generalmente idrocarburi da 15 a 25 atomi di carbonio.

Dato che si tratta di una miscela di idrocarburi e quindi non essendoci una formula chimica, considereremo una molecola di lunghezza media per avere un'idea della quantità di anidride carbonica sviluppata durante la combustione ideale [6]:

$$2 C_{16}H_{34} + 49O_2 \rightarrow 32CO_2 + 34 H_2O$$

In questo caso dalla combustione di due molecole si ottengono ben 32 Molecole di CO₂ e 34 di vapore acqueo.

Nella realtà però ciò che viene emesso dallo scarico di un motore diesel è molto più inquinante.

L'imperfetta combustione nel motore diesel causa infatti la formazione di sostanze altamente inquinanti e cancerogene che contribuiscono all'inquinamento locale, mentre la scarsa efficienza del motore determina un aumento dei consumi che si traduce in aumento dei gas serra come abbiamo precedentemente accennato.

Il problema della riduzione delle emissioni del Diesel, e cioè essenzialmente degli NOx e del soot, è notevolmente complicato dal fatto che i tentativi di ridurre le emissioni di soot direttamente in camera di combustione hanno come conseguenza quella di aumentare le emissioni di NOx e viceversa. Occorre dunque ricorrere ad appositi sistemi per la conversione degli ossidi di azoto.

1.3.2 Motori a Benzina

Il motore a benzina è il motore a combustione interna più diffuso all'interno del parco auto circolante italiano, anche se a cavallo tra il 2000 e il 2015 le vendite hanno subito un calo a favore della diffusione delle auto diesel.

Il motore a benzina è noto anche come motore ad accensione comandata e segue il ciclo detto otto che utilizza una miscela aria-combustibile compressa nella camera di combustione e attraverso un detonatore (candela) viene avviata la combustione. Anche in questo caso l'espansione dei gas combusti spinge il pistone trasferendo energia meccanica al sistema biella-manovella e all'albero motore.

Le fasi principali di un motore a benzina sono riassunte nella figura 1.7.

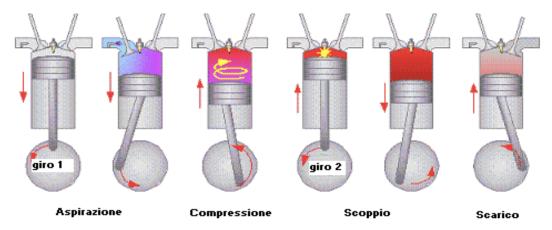


Figura 1.7: fasi caratteristiche di un motore a ciclo otto.

Nei motori a ciclo otto viene utilizzato come combustibile la benzina.

Essa viene ottenuta dalla distillazione del petrolio grezzo nelle torri di frazionamento. A temperatura ambiente si trova allo stato liquido risulta altamente infiammabile, trasparente, incolore, oleosa e dall'odore acuto. È possibile ottenere benzina con le frazioni più pesanti, grazie a un trattamento detto cracking catalitico.

Come per il gasolio anche la benzina dal punto di vista chimico è una miscela di idrocarburi il cui numero di atomi di carbonio è compreso tra 5 e 10.

Per dare un'idea della quantità di anidride carbonica sviluppata dalla combustione (ideale) consideriamo la combustione [6]:

$$2 C_8H_{18} + 25 O_2 \rightarrow 16 CO_2 + 18 H_2O$$

Dalla combustione di due molecole di ottano si sviluppano dunque 16 molecole di anidride

carbonica e 18 di vapore acqueo.

Per quanto riguarda le emissioni dei motori a benzina a causa dell'imperfetta combustione si sviluppano CO, NOx, HC e PM.

In questi motori si utilizzano dei convertitori catalitici (catalizzatori) che riducono le emissioni inquinanti.

I catalizzatori a tre vie utilizzati normalmente su questo tipo di vetture permettono la riduzione delle emissioni inquinanti tra l'80 e il 90% [7].

1.3.3 Metano

Il metano è un idrocarburo semplice composto da un atomo di carbonio e da quattro atomi di idrogeno, si sviluppa a seguito di numerosi processi chimici compreso il processo di raffinazione del petrolio.

I prodotti della combustione del metano sono anche in questo caso CO₂ e H₂O come descritto dalla seguente reazione:

$$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$$
.

Dalla combustione stechiometrica del metano si ottiene una sola molecola di CO₂ e due di H₂O.

1.4 Strategie e obiettivi futuri

Le case automobilistiche sono chiamate dunque a contribuire alla riduzione sia delle sostanze inquinanti, sia dei gas serra in particolar modo della CO₂, le prime derivanti dall'imperfetta combustione e responsabili dell'inquinamento locale, i secondi dalla chimica del combustibile e responsabili del surriscaldamento globale.

Per ridurre le sostanze inquinanti occorre dunque migliorare i processi di combustione e avere un controllo delle emissioni efficiente.

Tante sono le soluzioni proposte che vedono l'utilizzo di catalizzatori e filtri per ridurre al minimo la diffusione in atmosfera di agenti inquinanti.

Per quanto riguarda le emissioni di CO₂ invece, essendo direttamente collegate al consumo di carburante, l'unico modo per ridurre le emissioni è quello di ridurre i consumi.

Da qualche anno le case automobilistiche hanno adottato degli accorgimenti al fine di migliorare l'efficienza delle automobili e ridurre i consumi di carburante tra questi possiamo elencarne alcuni:

- l'utilizzo di pneumatici a bassa resistenza al rotolamento;
- sensori di controllo della pressione dei pneumatici per ottimizzare l'attrito volvente;
- indicatori di cambio marcia per cambiare la marcia al regime di rotazione ottimale;

- riduzione della massa complessiva grazie all'utilizzo di materiali più leggeri e performanti;
- downsizing del motore che permette di avere potenze specifiche più elevate e ridurre consumi ed emissioni;
- coefficienti di resistenza aerodinamica ottimizzati per migliorare l'efficienza aerodinamica soprattutto nei percorsi extra urbani;
- sistema start & stop che arresta il motore quando l'auto è ferma a un semaforo o nel traffico;
- set up personalizzabile della centralina controllo motore per poter ottimizzare i consumi in funzione delle esigenze di guida.

Complessivamente questi accorgimenti hanno permesso di avere riduzioni del consumo di carburante che vanno dal 5% al 10%, ma la strada è ancora lunga, e i recenti avvenimenti che hanno coinvolto soprattutto le auto diesel, dimostrano che probabilmente gli investimenti portati avanti fino ad oggi non sono stati sufficienti a centrare gli obiettivi. Si prevede dunque un cambiamento di rotta di cui parleremo nel prossimo capitolo.

Capitolo II

Elettrificazione del parco auto

Nel capitolo precedente abbiamo visto come il traffico urbano incide sulla qualità dell'aria a livello locale e come i consumi energetici invece contribuiscono alla diffusione di gas serra nell'ambiente a livello globale.

Una delle soluzioni proposte dalle case automobilistiche, al fine di abbattere le emissioni e ridurre i consumi, è quella di utilizzare la trazione elettrica come alternativa ai motori a combustione interna.

Le origini dell'automobile elettrica sono più remote di quanto si possa credere.

I primi modelli di auto elettrica risalgono infatti ai primi anni dell'800. A quel tempo il petrolio non era considerato la fonte primaria di energia pertanto la trazione elettrica sembrava una valida alternativa alla trazione animale o a vapore.

Le auto elettriche quindi venivano commercializzate e vendute tra la seconda metà del '800 e gli inizi del '900 (fig.2.1).



Fig.2.1 Volantino pubblicitario di un'auto elettrica risalente agli inizi del '900. Fonte: E-mobility Report 2017

Lo sviluppo del motore a combustione interna, l'invenzione della frizione e del motorino d'avviamento uniti alla disponibilità del petrolio, furono fattori determinanti a far sì che l'interesse per i motori elettrici venne meno e le auto elettriche a causa dei vari problemi come autonomia, efficienza, sicurezza e affidabilità vennero completamente abbandonate per lasciare spazio al petrolio.

A partire dagli anni 2000 però la consapevolezza delle problematiche ambientali e la

preoccupazione sul possibile esaurimento del petrolio, hanno spostato l'attenzione e permesso di investire su quelle che vengono definite fonti rinnovabili e sui sistemi di trasporto a trazione elettrica.

Energia e trasporti sono infatti tra i punti chiave per ridurre l'inquinamento e raggiungere gli obiettivi a lungo termine che la comunità internazionale si è prefissata.

2.1 Processo di elettrificazione

Rimpiazzare l'attuale parco auto circolante con auto esclusivamente elettriche richiede un percorso che durerà diversi decenni.

I problemi legati alle batterie elettriche tra cui sicurezza, autonomia, densità energetica, disponibilità delle infrastrutture di ricarica, tempistiche di ricarica e smaltimento non sono ancora stati completamente risolti, inoltre i costi rispetto alle tecnologie tradizionali sono ancora molto alti e questo ne svantaggia sicuramente la diffusione.

Proprio per superare questo gap e cercare di trovare un compromesso tra passato e futuro le case automobilistiche hanno iniziato a introdurre, all'interno della propria flotta, delle soluzioni che rendono le auto tradizionali più efficienti e soprattutto che si orientino alla mobilità elettrica cominciando così quello che possiamo definire un processo di elettrificazione.

Nella presente trattazione si è voluto guardare a questo processo come a un vero e proprio processo evolutivo nel quale le auto tradizionali si trasformano fino a diventare elettriche.

Come tutti i processi evolutivi anche quello che porta un'auto tradizionale a diventare completamente elettrica ha quindi delle tappe intermedie da percorrere. Possiamo immaginare il processo di elettrificazione come un percorso in cui definiremo degli step o milestone ai quali è possibile attribuire un grado di ibridizzazione come illustrato in fig.2.2.

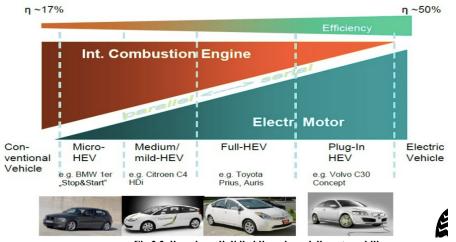


Fig.2.2 diversi gradi di ibridizzazione delle automobili.

I rendimenti indicati in figura si riferiscono agli indici well to wheel.

Per quanto riguarda il settore automotive, secondo uno studio del "Boston consoulting group", il trend per i prossimi anni è che entro il 2030 il 14% delle auto vendute sarà a trazione puramente elettrica [8].

Possiamo definire grado di ibridizzazione di una vettura come segue: [9]:

$$GDI = \frac{PE}{(PE + PCI)}$$

Con PE: Potenza erogata dal motore elettrico;

PCI: Potenza erogata dal motore a combustione interna;

Come si può facilmente evincere dalla formula il valore può variare tra GDI=0 (per un'auto tradizionale) e GDI=1 per un'auto completamente elettrica.

2.1.1 Micro HEV (Micro Hybrid Electric Vehicle)

Il primo step nel processo di elettrificazione con un fattore di ibridizzazione tra il 5 e il 10% [10] è quello del "micro Hybrid".

Queste auto non sono delle vere e proprie ibride in quanto non hanno un motore elettrico utilizzato per la trazione ma solo alcune soluzioni tecniche introdotte per aumentarne l'efficienza, diminuire il consumo di carburante e ridurre le emissioni.

In particolare sono considerare micro ibride tutte le vetture dotate del sistema start & stop che spegne il motore ogni volta che la vettura è in fase di arresto, un sistema ormai utilizzato sulla maggior parte delle vetture che permette una riduzione minima dei consumi che varia tra il 5 e il 10%.

Un ulteriore soluzione che consente a un'auto di essere considerata micro ibrida è quella dell'utilizzo del sistema di gestione della carica della batteria.

È stato calcolato che l'alternatore è responsabile dell'assorbimento di circa il 10% dell'energia prodotta dal motore e dato che la batteria si trova in stato di carica completa nella maggior parte del tempo, quest'energia viene inutilmente prelevata.

Con l'utilizzo di questo sistema l'alternatore viene attivato esclusivamente quando lo stato di carica (SOC) scende sotto un certo livello, questo permette di eliminare in maniera temporanea un accessorio che preleva dal motore energia aumentandone i consumi.

Ovviamente questo tipo di soluzione risulta essere più efficiente sulle lunghe tratte dove la batteria mantiene un SOC tale da escludere l'alternatore.

Accoppiato a questo sistema si trova spesso anche il recupero energia in fase di frenata che

trasforma l'energia in frenata in energia elettrica da riutilizzare nella batteria.

Una delle ultime tendenze in ambito automotive è quello di sostituire il gruppo motorino di avviamento più alternatore con un motore/generatore, questo sistema funziona anche da sistema recupero energia in frenata oltre che da motorino d'avviamento.

2.1.2 MHEV (Mild Hybrid Electric Vehicle)

Il primo step che prevede l'utilizzo di un motore elettrico è il mild mybrid con un fattore di ibridizzazione tra il 10 e il 20% [10].

In questo caso il motore elettrico risulta esclusivamente di tipo ausiliario ed è alimentato a media tensione, generalmente 48V.

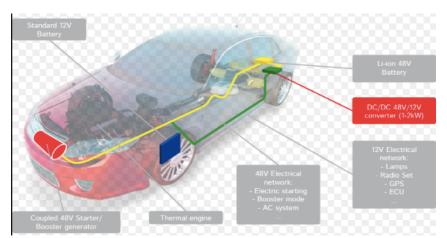


Figura 2.3: schema semplificato di un sistema mild hybrid. Fonte: innovative in magnetics.

In questo caso il motore elettrico funziona da boost e fornisce la potenza aggiuntiva solo quando è richiesta, ad esempio in fase di accelerazione durante un sorpasso, o in particolari condizioni di marcia come in autostrada a velocità costante in modalità detta "veleggio", oppure in fase di marcia a velocità ridotta come in fase di arresto o di ripartenza nel traffico.

Nel sistema mild hybrid tutte le utenze che generalmente vengono collegate all'albero motore sono comandate da commutatori elettrici alimentati dal circuito a 48V. La batteria 12V è sempre presente e alimenta le classiche utenze che richiedono corrente a bassa tensione, in questo caso il circuito è collegato a un convertitore DC/DC che trasforma la corrente da 48 a 12V.

Oltre all'ausilio alla trazione quindi il sistema mild hybrid elimina dal motore la potenza assorbita dagli accessori permettendo una riduzione dei consumi di carburante.

Le case automobilistiche hanno investito e continuano a investire su questo tipo di soluzione, in quanto permette di avere un impatto evidente sui consumi utilizzando un sistema relativamente semplice ed economico e che non richiede gli accorgimenti di sicurezza necessari per i sistemi

alimentati ad alta tensione come avviene per le macchine completamente elettriche o per le ibride pure o Plug-in [12].

2.1.3 HEV (Hybrid Electric Vehicle)

Con la sigla HEV vengono indicate le auto completamente ibride.

Letteralmente la parola ibrida indica un doppio tipo di alimentazione quindi possono essere considerate ibride anche tutte le vetture benzina/metano o benzina/gpl. Nel senso comune però si associano al termine ibride le auto che hanno sia un motore elettrico che un motore a combustione interna

Un'importante distinzione tra le auto ibride viene fatta in funzione del tipo di architettura che può essere in parallelo, in serie o serie/parallelo.

2.1.3.1 Ibrido parallelo

Con questa configurazione il motore elettrico e il motore a combustione interna sono entrambi collegati alla trasmissione e quindi alle ruote. A seconda della potenza dei motori installati si può usare il motore termico come ausiliario, se la trazione principale è affidata al motore elettrico, o come motore principale, se la trazione elettrica interviene solo per fornire una percentuale di potenza limitata [11].

Lo schema di questo tipo di architettura è schematizzato in figura 2.4:

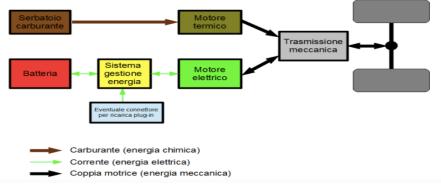


Figura 2.4: Schema ibrido parallelo: Fonte: Green start.

2.1.3.2 Ibrido Serie

In questa configurazione la trazione del veicolo è affidata esclusivamente al motore elettrico mentre il motore a combustione interna viene utilizzato come generatore di corrente [11].

I vantaggi di questa configurazione risiedono nel fatto che il motore elettrico lavora sulla trazione, mentre il motore a combustione interna, non avendo un regime di rotazione variabile, come succede nelle auto tradizionali, viene fatto funzionare nel punto di massimo rendimento per generare la corrente necessaria alla carica della batteria e all'alimentazione del motore elettrico. In figura 2.5 è riportata una curva caratteristica per un motore a combustione interna.

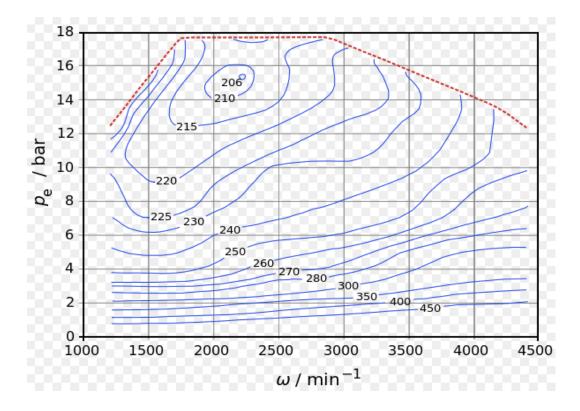


Figura 2.5: diagramma di consumo specifico carburante per un motore diesel. Fonte: Motortechnische Zeitschrift MTZ 1/2005

Nel diagramma in figura 2.5 è possibile osservare come per uno specifico motore, lavorando a una pme* (pressione media effettiva) di circa 15 bar e a una rotazione di 2200 giri/min, il consumo di carburante è minimo ed equivale a 206g/kWh.

Una volta terminata la carica della batteria il motore a combustione si arresta e l'auto procede con la trazione elettrica.

Possiamo guardare alle auto ibride serie come auto elettriche che hanno un "range extender" che permette quindi di estenderne l'autonomia.

Lo svantaggio di questo tipo di schema è che in caso di limitazioni del traffico nonostante la trazione di tipo elettrico non è possibile circolare quando la batteria è in fase di carica, in quanto il range extender è un motore a combustione con le relative emissioni.

In figura 2.6 è possibile vedere lo schema relativo alla configurazione ibrido serie.

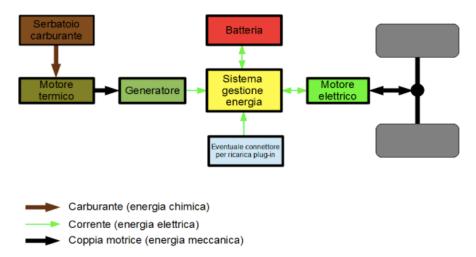


Figura 2.6: schema ibrido serie. Fonte: Green start.

2.1.3.3 Ibrido misto (serie-parallelo)

La configurazione in ibrido misto cerca di sfruttare i vantaggi di entrambe le configurazioni descritte sopra, utilizzando all'occorrenza la configurazione in serie quando la trazione elettrica è sufficiente a soddisfare le esigenze dell'utente, lasciando al motore termico il compito di alimentare il motore elettrico o di caricare le batterie, o in parallelo quando è richiesta potenza ausiliaria alle ruote, in tal caso il motore termico agisce in tandem per erogare la potenza aggiuntiva richiesta. Tale schema risulta il più efficiente ma è anche il più complesso e costoso in quanto necessita di particolari collegamenti meccanici per realizzare l'accoppiamento tra motore termico ed elettrico [11].

In figura 2.7 lo schema riferito a questo tipo di configurazione.

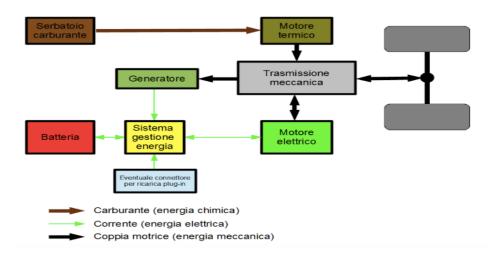


Figura 2.7: configurazione ibrido mista. Fonte: Green Start

2.1.4 PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)

Le auto ibride plug-in introducono nell'architettura ibrida la possibilità di ricaricare la batteria attraverso una presa di corrente elettrica e utilizzare l'auto in modalità esclusivamente elettrica quando necessario [12].

Le auto ibride plug-in nascono con la filosofia di trovare un compromesso tra i vantaggi delle auto tradizionali in termini di autonomia e consumi sulle lunghe percorrenze e quelli relativi ai motori elettrici in termini di emissioni sui percorsi urbani o sulle brevi percorrenze.

L'autonomia di queste vetture in modalità elettrica è limitata rispetto ai modelli di auto completamente elettriche, in quanto l'architettura stessa delle vetture (oltre al motore elettrico sono dotate di serbatoio e motore termico) non permette di avere spazio sufficiente per batterie di elevate capacità.



Figura 2.8: auto PHEV in carica.

Per quanto riguarda i percorsi lunghi invece è possibile guidare l'auto in modalità ibrida e risparmiare sul consumo di carburante grazie al motore elettrico che funge da ausilio nelle situazioni richieste, come ad esempio durante un sorpasso oppure a velocità costante in autostrada, grazie alla cosiddetta modalità di veleggio.

Come vedremo nei prossimi capitoli il limite di questo tipo di auto è che se non viene usata in maniera efficiente rischia di perdere completamente i suoi vantaggi e trasformarsi in un'auto tradizionale con consumi addirittura più elevati.

2.1.5 BEV (Battery Electric Vehicle)

L'ultimo step nella scala evolutiva dell'automobile corrisponde alla vettura completamente elettrica alimentata a batterie o BEV (battery electric vehicle).

Queste sono auto a propulsione puramente elettrica che a differenza delle ibride Plug-in non hanno il motore a combustione interna e il pacco batterie è dimensionato per garantire un'autonomia più ampia [12].

La modalità di ricarica di queste auto prevede una ricarica lenta utilizzando la presa domestica e una ricarica veloce utilizzando la rete industriale.

Alcune case automobilistiche hanno presentato dei modelli con batterie che superano la capacità di 100 kWh e che quindi consentono un'autonomia di diverse centinaia di km.

Uno dei problemi principali di queste auto è il tempo richiesto per la ricarica. Se non si dispone di una presa industriale può essere molto lungo a seconda della capacità delle batterie.

Di recente tante sono le case automobilistiche che hanno introdotto tra la propria flotta delle auto completamente elettriche.

2.1.6 FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)

Infine per completare l'elenco delle tecnologie che utilizzano la trazione elettrica citiamo le FCEV "Fuel Cell Electric Vehicle", le quali utilizzano delle pile a combustibile alimentate ad idrogeno per alimentare il motore elettrico [12].

I problemi legati a questo tipo di tecnologia sono tanti a partire dalla disponibilità dell'idrogeno, il suo stoccaggio e le tematiche legate alla sicurezza.

Alcune case automobilistiche hanno introdotto recentemente queste auto all'interno del proprio listino nonostante la disponibilità limitata di punti di rifornimento di idrogeno.

Capitolo III

Stato dell'arte

In questa sezione, dopo un'introduzione sullo stato dell'arte generale sugli studi relativi all'elettrificazione del parco auto e ai relativi consumi ed emissioni, si passa alla trattazione in letteratura del problema specifico relativo ai consumi, emissioni e costi delle auto ibride plugin, con uno studio completo che tiene conto dei consumi su tre cicli di guida standard relativi a USA, Europa e Giappone.

3.1 Stato dell'arte generale

I temi relativi all'elettrificazione del parco auto e delle auto Plug-in sono ormai conosciuti e discussi in tutto il mondo. Esistono infatti un gran numero di studi che hanno l'obiettivo di migliorare le prestazioni e ridurre lo svantaggio che le architetture alternative hanno nei confronti delle automobili tradizionali.

A titolo esemplificativo vengono di seguito citati alcuni libri e pubblicazioni scientifiche sull'argomento elettrificazione e auto ibride Plug-in.

Un libro molto rappresentativo di questo vasto argomento che tratta moltissimi aspetti legati alla "fuel consumption" (consumi di carburante) e che racchiude i progressi della tecnica nel settore automotive è [12]:

• R. Folkson, Alternative fuels and advanced vehicle Technologies for Improved Environmental performance. Elsevier Science & Technology, 2014;

Un articolo molto interessante in cui GM e il politecnico di Torino hanno sperimentato le potenzialità nella riduzione dei consumi e nelle emissioni di micro, mild e full Hybrid-Diesel, per veicoli leggeri e medi basati sul GM 1.9 quattro cilindri è [13]:

 A.E. Catania, E. Spessa, V. Paladini, A. Vassallo. Fuel Consumption and Emissions of Hybrid Diesel Application, Springer Fachmedien Wiesbaden 2008.

Un altro articolo che riporta i reali benefici in termini di riduzione della CO₂ e dei costi agli utenti delle auto ad architettura ibrida plug-in (PHEV) tenendo conto dell'efficienza dei motori a combustione interna e del mix produttivo di energia elettrica è [14]:

• F. Millo, L. Rolando, R. Fuso, F. Mallamo. Real CO₂ emissions benefits and end user's

operating costs of plug-in Hybrid Electric Vehicl. Applied Energy 2014 Elsevier. Un interessante studio, che analizza l'impatto ambientale dei motori elettrici per applicazioni automotive, tratta sia delle fasi produttive sia del ciclo di utilizzo e dello smaltimento e considera la tossicità dei materiali utilizzati nella costruzione degli stessi è il seguente [15]:

M.Hernandez, M. Messagie, O.Hegazy, L.Marengo, O.Winter, J. Van Mierlo.
 Environmental impact of traction electric motors for electric vehicle application. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.

Se si considerano i fattori che influenzano i consumi nel traffico urbano, uno studio che riporta le emissioni di CO₂ e che prende in esame diversi tipi di veicoli e condizioni del traffico compreso il fenomeno dello stop and go è il seguente [16]:

• Z. Li, L. Chen, S. Xu, Y. Qian. Analitical studies of CO₂ emission in a mixed traffic flow with different vehicles. Elsevier 2014.

3.2 Stato dell'arte su analisi dei consumi energetici di auto ibride Plug-in

In questo paragrafo verranno riportati dei dati tratti da uno studio realizzato da due docenti dell'università di Lisbona che forniscono un'idea delle prestazioni delle ibride Plug-in e i relativi consumi.

Anche se questo studio risale al 2010 è comunque interessante analizzare i risultati riportati da questo studio per capire se i progressi degli ultimi anni siano stati in grado di risolvere, almeno in parte, le problematiche legate a questo tipo di architettura.

Gli autori in questo studio analizzano i cicli di guida standard di tre macro-aree, in particolare UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) e HWFET (Highway Fuel Economy Test) per USA, NEDC (New European Driving Cycle) per Europa e il JC08 per il Giappone [17]. Lo studio in questione è il seguente:

• C. Silva, T. Farias. Evaluation of Energy Consuption, Emissions and Costs of Plug-in Hybrid Vehicles. Elsevier 2010

Da questo studio emerge che le auto Ibride hanno una duplice sorgente di energia, quella elettrica (prelevata dalla rete elettrica e dal sistema di recupero energia in frenata) e quella chimica del combustibile fossile convertita in energia meccanica dal motore a combustione

interna.

Sono state effettuate interviste ai possessori di auto ibride dall' Electric Power Research Institute (EPRI) e ai possessori di Toyota Prius dall'università della California (UCDavis). Risulta da queste interviste che la maggior parte degli utenti preferisce ricaricare la vettura dalla rete elettrica piuttosto che fare rifornimento a causa del costo ridotto dell'energia elettrica rispetto a quello del carburante [17].

Questo significa che la modalità di scarica CD (Charge depleting) viene preferita alla modalità di mantenimento della carica CS (Charge Sustaining) che prevede l'utilizzo del motore a combustione interna.

Anche per le auto ibride i consumi energetici sono influenzati dal ciclo di guida. I cicli urbani avranno maggiori consumi rispetto ai cicli extraurbani.

Le distanze medie dei percorsi casa-lavoro per Stati Uniti, Europa e Giappone sono riportate in figura 3.1, pertanto viene considerata a livello globale una percorrenza media di 20 Km.

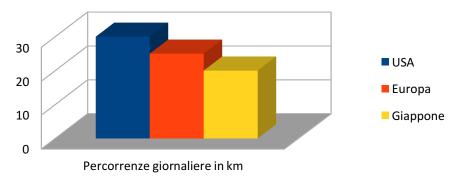


Figura 3.1 Percorrenze Giornaliere

Per quanto riguarda le emissioni di CO₂, a parte le emissioni prodotte dal motore a combustione interna, occorre considerare anche la produzione di energia elettrica utilizzata per alimentare le auto in particolare il well-to tank che tiene conto anche dei processi di produzione del carburante. In definitiva secondo Silva e Farias (2010) i fattori che influenzano il consumo e le emissioni per un PHEV sono:

- Sistema di gestione della trasmissione;
- frequenza di carica;
- cicli di guida;
- fonti energetiche (carburante ed elettricità).

Lo studio pubblicato da Carla Silva e Tiago Farias considera due vetture di riferimento con architettura ibrida in serie e in parallelo:

Configurazione	Serie	Parallelo
Peso [kg]	1323	1234
Carburante	Benzina	Benzina
Potenza motore elettrico [kW]	75	30
Potenza motore termico [kW]	53	41
Generatore elettrico [kW]	53	-
Capacità Batteria [kWh]	15	15
Stato di carica ingresso ICE [%]	45	30
Rapporto peso/potenza [W/kg]	57	59

Tabella 3.1 caratteristiche tecniche vetture di riferimento. Fonte: C. Silva, T. Farias. Evaluation of Energy Consuption,

Emissions and Costs of Plug-in Hybrid Vehicles. Elsevier 2010

Per il calcolo dei consumi di carburante sono stati considerati i seguenti scenari:

- 100% CD, il guidatore effettua gli spostamenti in modalità full-electric partendo sempre dalla vettura completamente carica;
- 100% CS, il guidatore non carica mai la vettura e quindi avrà sempre bisogno del motore a combustione per poter circolare;
- 20 km CD, simile al 100% CD, ma in questo caso il guidatore percorre sempre 20km partendo dalla vettura completamente carica;
- Base, che tiene conto del 50% in CS e 50% in CD;

I veicoli sono stati testati utilizzando i cicli standard di USA; EU e Giappone con i seguenti risultati:

Modalità	Consumo di carburante [l/100 km]	Consumo di elettricità [Wh/km]	Emissioni HC [g/km]	Emissioni CO [g/km]	Emissioni NO _x [g/km]
100% CD	0/2,7	123/70	0/0,06	0/0,40	0/0,08
100% CS	5,3/5,7	-	0,34/0,23	1,12/1,02	0,31/0,38
Base	2,6/4,2	62/35	0,17/0,14	0,60/0,71	0,16/0,18
20 km CD	0/0,8	123/117	0/0,09	0/0,37	0/0,06

Tabella 3.2: consumi ed emissioni per architettura serie/parallelo secondo ciclo USA. Fonte: C. Silva, T. Farias.

Evaluation of Energy Consuption, Emissions and Costs of Plug-in Hybrid Vehicles. Elsevier 2010

Modalità	Consumo di carburante [l/100 km]	Consumo di elettricità [Wh/km]	Emissioni HC [g/km]	Emissioni CO [g/km]	Emissioni NO _x [g/km]
100% CD	0/2,8	123/72	0/0,08	0/0,49	0/0,10
100% CS	5,6/6,8	0	0,65/0,43	2,11/1,69	0,50/0,41
Base	2,6/4,8	62/36	0,32/0,43	0,60/0,71	0,25/0,26
20 km CD	0/0,02	123/110	0/0,19	0/1,31	0/0,20

Tabella 3.3:consumi ed emissioni per architettura serie/parallelo secondo ciclo Europa. Fonte: C. Silva, T. Farias.

Evaluation of Energy Consuption, Emissions and Costs of Plug-in Hybrid Vehicles. Elsevier 2010

Modalità	Consumo di carburante [l/100 km]	Consumo di elettricità [Wh/km]	Emissioni HC [g/km]	Emissioni CO [g/km]	Emissioni NO _x [g/km]
100% CD	0/1,6	123/73	0/0,07	0/0,31	0/0,07
100% CS	5,8/6,5	0	0,68/0,43	2,18/1,96	0,52/0,41
Base	2,8/3,9	62/37	0,16/0,13	0,49/0,58	0,14/0,18
20 km CD	0/0	123/130	0/0	0/0	0/0

Tabella 3.4: consumi ed emissioni per architettura serie/parallelo secondo ciclo Giappone Fonte: C. Silva, T. Farias.

Evaluation of Energy Consuption, Emissions and Costs of Plug-in Hybrid Vehicles. Elsevier 2010

I risultati evidenziano chiaramente che le emissioni e il consumo di carburante dipendono principalmente dalla modalità di utilizzo e possono dare indicazioni sul tipo percorso per le quali sono indicate le auto ibride, nei percorsi 20 km CD è infatti presente esclusivamente la quota elettrica.

La modalità CS presenta valori di consumo carburante ed emissioni prossimi allo 0 solo nei percorsi 20 km CD, mentre nella modalità 100% CD i consumi aumentano anche del 160%.

Il consumo di corrente in modalità 100% elettrica verranno utilizzati per valutare l'impatto della ricarica sulla rete, prendendo in considerazione il "worst case scenario" in cui tutte le auto Plugin vengono caricate contemporaneamente.

Per quanto riguarda l'autonomia in modalità elettrica entrambe le configurazioni hanno riportato approssimativamente lo stesso risultato (circa 55km di autonomia).

3.2.1 Emissioni globali di CO₂

Le normative relative alle emissioni di CO₂ tengono conto esclusivamente della produzione di emissioni a livello locale e non considerano la produzione di gas serra derivanti dalla produzione dell'energia elettrica, che nel caso dell'Unione Europea e degli Stati Uniti non può e non deve essere sottovalutata.

Dato che le emissioni di CO₂ sono una tematica a livello globale e non locale, gli autori (Silva e Farias) considerano nel loro studio, oltre alle emissioni derivanti dalla combustione del carburante anche quelle derivanti dalla produzione di energia elettrica e dal ciclo di produzione dei materiali e della vettura (well to wheel).

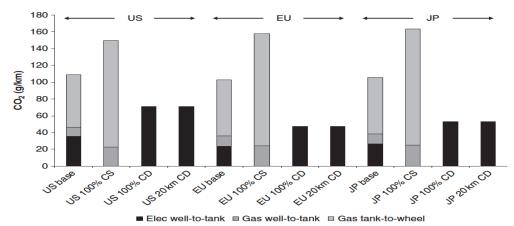


Figura 3.1: emissioni di CO₂ per configurazione ibrido serie secondo cicli USA, EU e Giappone. Fonte: C. Silva, T. Farias. *Evaluation of Energy Consuption, Emissions and Costs of Plug-in Hybrid Vehicles*. Elsevier 2010

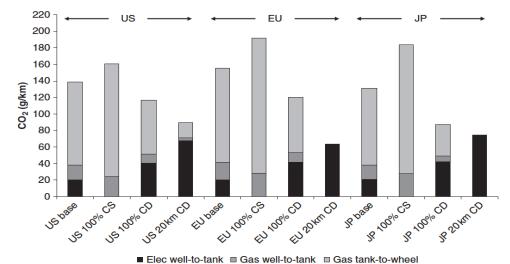


Figura x: emissioni di CO₂ per configurazione ibrido parallelo secondo cicli USA, EU e Giappone. Fonte: C. Silva, T. Farias. Evaluation of Energy Consuption, Emissions and Costs of Plug-in Hybrid Vehicles. Elsevier 2010

Dalla lettura dei dati si vede chiaramente che considerando la modalità 100% CS non ci sono vantaggi in termini di emissioni, mentre con un andamento esclusivamente elettrico 100% CD i valori arrivano a dimezzarsi.

Le emissioni di CO₂ relative al ciclo vita di una vettura ibrida serie, che percorre in media 20km al giorno, sono state calcolate a circa 25t per 300000km di percorrenza (circa 80g/km) di cui, il 40% dal ciclo dei materiali, e la restante parte dal consumo elettrico. Se si considera una vettura che percorre con le stesse modalità 150000km la quota relativa al ciclo dei materiali sale al 60%. Le stime sono state effettuate considerando che per la produzione di un'auto ibrida, considerando anche la batteria, vengono emesse 10t di CO₂.

3.2.2 Impatto sulla rete elettrica

Per quanto riguarda l'impatto della ricarica dei PHEV sulla rete elettrica, lo studio di Silva e Farias (2010), tiene conto della peggiore ipotesi in cui 1 milione di auto vengono ricaricate contemporaneamente assorbendo circa 3,8 GW di potenza con la batteria completamente scarica, mentre se si considerano i soli 20 km di percorrenza standard la potenza assorbita scende a 1 GW.

Come vedremo più avanti una considerazione analoga è stata fatta sulla base della presente trattazione, mettendo i dati ottenuti in relazione al sistema elettrico italiano.

3.2.3 Costi delle auto ibride

Un aspetto molto importante è quello dei costi che influenzano nella maggior parte dei casi la scelta da parte di un utilizzatore.

Per la valutazione dei costi lo studio di Silva/Farias tiene conto di:

- sovrapprezzo di acquisto che oscilla tra €4000 e €10000 rispetto alle auto tradizionali;
- manutenzione circa uguale per chilometraggio fino a 150000 km mentre da €2000 a
 €7000 per la sostituzione delle batterie per distanze superiori;
- Tassa di possesso circa uguale se non inferiore;

Dalle precedenti considerazioni su costi e benefici delle auto elettriche plug-in, il "Breakeven point" indicato dagli autori si attesta intorno ai 150000 km. Questo valore non è però in linea con le percorrenze medie giornaliere per percorsi esclusivamente lavorativi, calcolati a 20km al giorno, infatti considerando che ci sono circa 220 giorni lavorativi, le percorrenze annue si attesterebbero a circa 5000 km all'anno con un tempo di ammortamento di circa 30 anni il quale risulta un valore di durata impensabile per autovetture di questo tipo.

Se si considera una percorrenza media di 15000 km all'anno il tempo di ammortamento scende a 10 anni, ma considerando percorsi più lunghi i benefici economici si riducono.

È di fondamentale importanza sottolineare il fatto che questi valori sono indicativi e con l'attuale progresso tecnologico in materia cambiano di anno in anno, pertanto devono essere contestualizzati al periodo in cui viene effettuata la ricerca.

Un aspetto fondamentale da considerare nell'analisi economica e che influenza maggiormente i consumatori sono i costi di acquisto e di manutenzione di queste auto. Tali costi sono legati al mercato, infatti si assiste a una progressiva riduzione del delta costo tra vetture tradizionali e vetture ibride.

Quest'aspetto è molto importante perché elimina progressivamente uno degli scogli che le vetture ibride hanno attualmente sul mercato.

Come anticipato in precedenza, una volta fatta la panoramica sul processo di elettrificazione e lo stato dell'arte, il focus di questo studio sarà quello di analizzare i reali consumi di un'auto ibrida Plug-in prendendo in esame diversi percorsi e aspetti per capire se questa tecnologia è sulla strada giusta per raggiungere l'obiettivo della riduzione delle emissioni e dei consumi energetici.

Capitolo IV

Le performance delle auto PHEV e il confronto con le auto tradizionali

Abbiamo accennato in precedenza che le auto ibride Plug-in nascono come chiave di collegamento tra le auto tradizionali e quelle a trazione alternativa, in virtù della loro architettura ibrida che permette, sia di utilizzare il motore elettrico quando necessario ricaricando la batteria tramite presa di corrente, sia di sfruttare i vantaggi legati all'autonomia della auto tradizionali. I dati relativi ai consumi e alle emissioni dichiarati dalle case automobilistiche oltre a essere molto ottimistici nascondono dei fattori molto importanti da tenere presente.

Come vedremo più avanti infatti i valori rilevati su percorsi in condizioni reali sono molto diversi rispetto a quelli dichiarati.

I dati di autonomia dichiarati infatti dalle case automobilistiche si basano sul NEDC (New European Driving Cycle) che a partire dal settembre 2017 è stato sostituito dal WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicle Test Procedure) per avvicinare i dati dichiarati ai dati reali. Entrambe le procedure come vedremo, forniscono risultati lontani dalla realtà.

Nel presente capitolo, dopo una prima parte introduttiva sulla componentistica utilizzata per questo tipo di vetture, verranno analizzati, confrontati e commentati alcuni dati rilevati su una delle vetture ibride Plug-in con sistema ibrido parallelo attualmente in commercio.

4.1 Batterie per auto PHEV

Uno dei componenti principali di un'auto ibrida plug-in è sicuramente la sua batteria.

Le caratteristiche che deve possedere una batteria per questo tipo di applicazione sono le seguenti:

- Sicurezza e affidabilità;
- Densità energetica elevata;
- Potenza elevata;
- Elevato numero di cicli;
- Riciclaggio, smaltimento e recupero dei materiali;

Le prime auto elettriche risalenti all'800 utilizzavano le batterie Piombo-acido le quali risultavano particolarmente economiche e facili da usare. Il problema di queste batterie è la bassa densità energetica.

Lo sviluppo tecnologico delle batterie continua con l'avvento delle batterie NiMH negli anni '90

e delle batterie Li-Ion negli anni '2000.

Per le auto PHEV vengono utilizzate esclusivamente batterie agli ioni di Litio, che possiedono caratteristiche superiori alle batterie NiMH, normalmente utilizzate su auto HEV in virtù del loro costo e della relativa maturità [18].

Nella tabella successiva vengono riportati dei dati relativi alle tecnologie sopra citate, ricordando che i dati specifici dipendono dal produttore:

Cella	Densità energetica [Wh/kg]	Voltaggio [V]	Cicli vita [n]
Piombo-acido	30-35	2,1	≈1200
NiMH	35-70	1,4	Da 300 a 500
Li-Ion	Fino a 300	3,7	oltre i 1000

Tabella 4.1: Dati comparativi per tecnologie di batterie: Fonte: A. Perner, J. Vetter. Lithium-ion batteries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicle. Elsevier 2015

Il concetto base che accomuna entrambe le tecnologie NiMH e Li-Ion è quello di ridurre dimensioni e massa e aumentare le performance come densità energetica e potenza disponibile riducendo il numero di celle a bordo veicolo.

Altri tipi di tecnologie (come celle a combustibile e supercapacitori) sono stati volutamente tralasciati in quanto risultano attualmente in fase di ricerca e sviluppo e non ancora commercializzati.

Dai dati contenuti nella tabella 4.1 è possibile vedere come le batterie agli ioni di Litio presentino dei valori più alti rispetto alle altre tecnologie, ma non ci sono solo dei vantaggi. Le batterie agli ioni di litio infatti consentono densità energetiche maggiori rispetto alle NiMH ma dato che le celle hanno bisogno di protezione e di un complesso sistema di controllo in quanto risentono dell'influenza della temperatura, non devono scaricarsi al di sotto di un certo valore della carica complessiva e devono essere sufficientemente protette da urti data la posizione di installazione (fig. 4.1) [19].

Un altro aspetto, non di natura tecnica ma certamente da non sottovalutare perché determinante sulle dinamiche di mercato, è sicuramente quello dei costi.

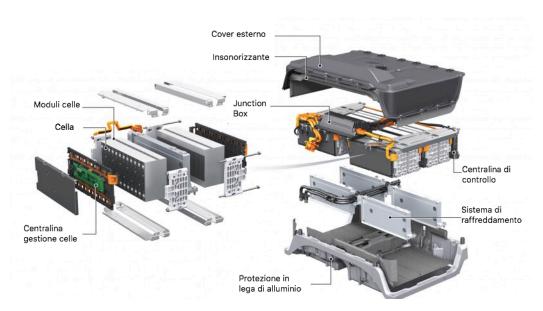


Figura 4.1 Modulo batteria agli Ioni di litio per Auto PHEV Fonte: Paultan.org

La società di consulenza McKinsey ha realizzato un'analisi sull'andamento del prezzo delle batterie agli ioni di litio per il mercato della trazione elettrica [20].

Secondo tale studio, il costo degli accumulatori al litio per le auto elettriche è sceso del 77% nel 2016 rispetto ai 1000\$/kWh del 2010 fig. 4.2, con le conseguenti logiche ed auspicate ricadute positive sul prezzo dei veicoli.

Secondo lo studio condotto da McKinsey 2017, si stima un ulteriore calo del prezzo di un pacco batterie agli ioni di litio per auto elettrica dagli attuali 227 dollari per kWh per scendere sotto i 200 \$/kWh nel 2020 e sotto i 100 \$/kWh nel 2030 [fig 4.2].

Dalla figura è possibile inoltre notare come il mercato ha subito una forte crescita a partire dal 2015, in corrispondenza di tale anno il costo delle batterie ha avuto una notevole diminuzione [20].

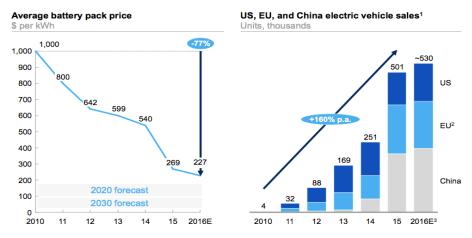


Figura 4.2: andamento del prezzo delle batterie agli Ioni di litio per trazione elettrica e del mercato di auto ibride plug-in ed elettriche. Fonte: *Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitabilitye*.

McKinsey&company 2017

4.2 Sistemi e modi di ricarica

L'architettura di queste auto, che siano serie o parallelo, richiede la presenza di un'infrastruttura di ricarica per poter ricaricare le batterie e della tradizionale colonnina di carburante per fare il pieno al serbatoio.

Per poter ricaricare la batteria però è necessaria un'apposita attrezzatura per ragioni di sicurezza. Esiste uno standard IEC 62196 che normalizza i tipi di connettori per veicoli elettrici [21]. Questo standard si basa su un altro standard IEC 61851che regola le caratteristiche generali dei sistemi di ricarica tra cui le modalità di ricarica e connessione e i requisiti di sicurezza.

I seguenti connettori sono regolati dal IEC 62196 e generalmente sono conosciuti con il loro nome commerciale:

- SAE J1772, conosciuto come connettore Yazaki, utilizzato in America settentrionale;
- VDE-AR-E 2623-2-2, conosciuto come connettore Mennekes, utilizzato in alcuni paesi d'Europa;
- EV Plug Alliance, conosciuto come connettore Scame, utilizzato in Italia e Francia;
- JEVS G105-1993, conosciuto come connettore CHAdeMO, utilizzato in Giappone.

Anche i modi attraverso i quali avviene la ricarica sono regolati, in particolare lo IEC 62196-1 considera i seguenti modi di ricarica, regolati dallo standard IEC 61851-1 [21], per ognuno dei quali vengono indicate le caratteristiche elettriche e le modalità di protezione e di utilizzo:

- Modo 1: è una connessione diretta passiva tra la vettura e la rete di alimentazione, a 250 V monofase o 480 V trifase, che comprende la terra e con corrente massima di 16 A. Questo tipo di connessione non prevede contatti di controllo. Per motivi di sicurezza il sistema di ricarica deve fornire la terra per la vettura e un sistema di protezione in caso di malfunzionamento. Questo modo è proibito nei paesi in cui non è obbligatoria la messa a terra in tutte le utenze domestiche (es. Stati Uniti);
- Modo 2: è una connessione diretta semi-attiva tra la vettura e la rete di alimentazione, a 250V monofase o 480V trifase, che comprende la terra e con corrente massima di 32A. Il sistema di alimentazione è collegato direttamente alla rete e deve fare parte o trovarsi a meno di 0,3 m dalla presa in corrente alternata. Tra il caricatore e la vettura la connessione è attiva con un sistema di controllo dei componenti passivi. Per quanto riguarda i sistemi di sicurezza il caricatore provvede alla messa a terra e alla protezione nel caso di malfunzionamento, protezione contro la sovracorrente e elevata temperatura e di un

sistema di spegnimento a seconda della potenza richiesta per la carica;

- Modo 3: è una connessione attiva tra la vettura e il caricatore a 250 V monofase o 480V trifase comprensiva di messa a terra e sistema di controllo. Deve avere un collegamento aggiuntivo adatto a una corrente massima di 250 A oppure 32A se il cavo è compatibile al modo 2. Il cavo di comunicazione tra auto e caricatore permette l'integrazione delle "smart grid" ossia i sistemi che permettono lo scambio di informazioni tra apparecchiature.
- Modo 4: è una connessione attiva tra vettura e caricatore a 600 V in corrente continua che
 comprende la messa a terra e sistema di controllo con corrente massima di 400 A. Il sistema
 di ricarica risulta più complesso e costoso in quanto è previsto un raddrizzatore di corrente
 alternata.

Generalmente le case automobilistiche forniscono con la vettura, anche un adattatore di tipo 1 per la presa di corrente domestica, in quanto le normali prese Shuko non sono adatte a potenze elevate per periodi prolungati come richiede la ricarica di una batteria (a 10A alla tensione di 230V). Installando nel box auto una stazione di ricarica a parete di tipo 2/3 è possibile caricare a 16A alla tensione di 230V e ridurre i tempi di ricarica [21].

Esiste la possibilità, ma solo per un numero limitato di auto e generalmente di tipo full EV, di ricarica veloce tramite collegamento alla rete industriale fino a 200A e 400V, tale collegamento riduce notevolmente i tempi di ricarica [21].

4.3 Fabbisogno energetico e tempistiche di ricarica.

Uno degli scogli che le auto plug-in, ibride o completamente elettriche, devono ancora superare è sicuramente la questione dei tempi di ricarica. Quest'aspetto è molto importante perché influenza molto il tipo di utilizzo di queste vetture.

Se pensiamo infatti che con un'auto tradizionale possiamo effettuare rifornimento in qualsiasi momento e con un tempo medio nell'ordine di qualche minuto, per fare il pieno di corrente occorre innanzitutto avere a disposizione una colonnina apposita per la ricarica e qualche ora di tempo per poter effettuare una carica completa [22].

La durata della ricarica di un'auto ibrida plug-in dipende da diversi fattori:

• Capacità: In genere la capacità di una batteria elettrica agli ioni di Litio utilizzata per questo tipo di applicazione dipende dal tipo di auto e dalle sue dimensioni. Automobili più grandi avranno bisogno di batterie con capacità più grandi a parità di autonomia. In media su auto di medie dimensioni la capacità delle batterie oscilla tra i 7 kWh e i 9

kWh;

- SOC (state of charge): ossia la carica residua della batteria calcolata come il rapporto tra carica residua e capacità della batteria [22]. Per auto che percorrono generalmente brevi percorsi succede di sovente che l'auto venga messa sotto carica con la batteria ancora parzialmente carica, ovviamente la carica residua permette la riduzione dei tempi di ricarica in maniera proporzionale allo stato di carica;
- Corrente e tensione di alimentazione: come visto in precedenza è possibile ricaricare tramite il cavo fornito con la vettura a una corrente di 10A e 230V (potenza 2,3 kW) oppure con box installato a parete di tipo 2/3 a 16A e 230V (Potenza 3,7 kW).

Si riportano a titolo d'esempio dei valori rilevati a batteria completamente scarica su diversi tipi di vetture plug-in presenti in commercio:

Modello	capacità batteria [kWh]	carica a 2,3 kW [min]	carica a 3,7 kW [min]
Audi a3 e-tron	8,8	228	138
BMW 225 Xe	7,6	198	120
Mercedes C350	6,2	162	96
Audi Q7 e-tron	17,3	450	276

Tabella 4.2: Valori medi dei tempi di ricarica batteria per diversi tipi di auto ibride plug-in. Fonte: Benchmarking.

I valori riportati in tabella derivano da un "benchmarking" condotto su un campione di auto ibride plug-in attualmente presenti in commercio (dicembre 2017).

Dalla lettura di questi dati è possibile notare come le tempistiche di ricarica, anche effettuando una ricarica lenta a 2,7 kW, non superano le 4 ore salvo nell'ultimo caso in cui ci vogliono più di 7 ore per ricaricare completamente le batterie. Ovviamente questi dati presi singolarmente non sono indicativi delle performance delle auto ma danno solo un'idea dei tempi necessari al completamento di una carica.

Considerando che in media le vetture vengono parcheggiate subito dopo il lavoro (mediamente verso le 19) e vengono riprese il mattino successivo (verso le 8) significa che hanno a disposizione un periodo di circa che va da 12h a 13h di ricarica che risulta molto più che sufficiente per la ricarica completa.

Diversa è la situazione per batterie di capienza oltre i 20 kWh, generalmente utilizzate su auto completamente elettriche, le quali con la potenza domestica necessitano di tempi di ricarica molto più lunghi.

Un altro aspetto molto importante già sottolineato nel capitolo sullo stato dell'arte e messo in evidenza dallo studio di Silva e Farias (2010), è la capacità del sistema elettrico a soddisfare la

richiesta di corrente extra per la ricarica delle auto elettriche/ibride Plug-in.

Analizzando la figura 4.2 è possibile notare l'andamento medio giornaliero dei consumi di energia elettrica in Italia.

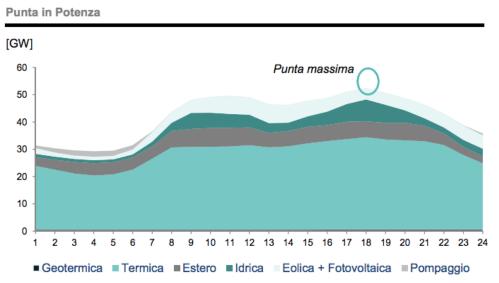


Figura 4.2: andamento medio giornaliero dei consumi di energia elettrica divisi per fonte in Italia. Fonte: Terna

Analizzando questo grafico possiamo notare come la punta massima corrisponde all'orario in cui mediamente una vettura PHEV o elettrica viene messa sotto carica, che coincide con la fascia oraria di rientro dall'ufficio per le categorie impiegatizie.

Dalla lettura del grafico 4.2 si può facilmente osservare che il sistema elettrico italiano, qualora venissero ricaricate le auto ibride plug-in ed elettriche nella fascia oraria che va dalle 16:30 alle 19:30, richiederebbe una quota di energia extra nel momento di picco massimo, incrementando la quota acquistata dall'estero [23] e di conseguenza questo contribuirebbe all'aumento del prezzo dell'energia elettrica.

Per risolvere questo problema sono attualmente in fase di sviluppo diverse soluzioni tra cui usare un timer per poter attivare la carica durante le ore notturne. Una soluzione più complessa ma più efficiente potrebbe essere dotare la colonnina di ricarica di un sistema "Smart" che permetta di ricaricare l'auto quando la richiesta energetica può essere facilmente soddisfatta dalla rete elettrica, ad esempio in corrispondenza del picco di produzione massimo di energia fotovoltaica o eolica nelle ore diurne o semplicemente durante le ore notturne.

Soluzioni di questo tipo oltre che ad essere necessarie per evitare di sovraccaricare la rete contribuiscono alla diminuzione del costo dell'energia elettrica.

Secondo uno studio del ICCT (International Council on Clean Trasportation) avere la possibilità di separare l'utenza domestica dal consumo di energia elettrica da parte dell'auto elettrica, aiuta ad avere chiari i consumi legati all'utilizzo dell'auto evitando di confondere l'utente che associa

l'aumento della bolletta elettrica all'utilizzo dell'auto [24].

Sempre nello stesso studio (ICCT) viene sottolineata l'importanza di caricare l'auto quando la richiesta di energia elettrica è bassa o in corrispondenza dei picchi produttivi utilizzando le smart grid per poter beneficiare di corrente elettrica a prezzo inferiore.

Negli Stati uniti alcuni gestori di energia elettrica, per incentivare l'utilizzo della corrente nei momenti di picco negativo, oltre a restituire una quota di circa 20\$ al mese a chi evita la ricarica dell'auto nella fascia tra le 14 e le 18 in più restituisce 0,05\$/kWh a chi carica l'auto da mezzanotte alle 18 [24].

4.4 Motori Elettrici per PHEV

Un altro componente di importanza fondamentale per una vettura ibrida plug-in è il suo motore elettrico.

La caratteristica fondamentale di un motore elettrico è quella di poter operare sia da motore durante la trazione (fase di scarica della batteria) che da generatore durante le fasi di frenata o di decelerazione.

In genere vengono impiegati per auto PHEV due tipi di motore:

- Motore a magneti permanenti;
- Motore a induzione;

A differenza dei motori endotermici che hanno rendimenti che oscillano tra il 20 e il 35%, i motori elettrici hanno rendimenti molto più elevati che arrivano in alcuni casi al 90%, anche se considerando la produzione di corrente il trasporto e la distribuzione l'efficienza di questi motori scende circa al 40%.

4.5 Fattori che influiscono sull'autonomia

Uno dei fattori di fondamentale importanza per gli utenti di autovetture plug-in è sicuramente l'autonomia.

Le case automobilistiche come succede per i dati dichiarati sui consumi per le auto tradizionali dichiarano anche per le auto plug-in dei valori molto diversi da quelli reali che differiscono anche più del 100% rispetto ai dati dichiarati [25].

Si riportano di seguito a titolo d'esempio alcuni valori reali confrontati con i dati dichiarati dalle case automobilistiche:

Modello	Tipologia	Autonomia Dichiarata [km]	Autonomia rilevata [km]	Consumi dichiarati [l/100km]	Consumi rilevati su ciclo combinato [l/100km]
Toyota Prius Hybrid	Ibrido serie- parallelo	>50	55	1	2,5
Audi A3 e- tron	Ibrido Parallelo	50	40	1,6	4,2
Mercedes Classe C	Ibrido parallelo	30	25	2,6	5,1

Tabella 4.2: Confronto tra valori dichiarati e valori rilevati. Fonte: Benchmarking auto ibride Plug-in.

Questa differenza tra i valori reali e i valori dichiarati proviene dal fatto che i test omologativi prevedono un ciclo (NEDC) la cui durata sfrutta generalmente i benefici della trazione elettrica, nella realtà i valori sono molto più alti in quanto le autonomie in gioco non consentono l'utilizzo esclusivo della trazione elettrica.

I valori di autonomia reali riportati nella tabella 4.2 sono riferiti a un ciclo guida extra-urbano a una velocità media di 60km/h e una temperatura esterna di 20°C.

Nel parlare di autonomia i fattori che entrano in gioco sono veramente molteplici e anche soggettivi in quanto dipendono dallo stile di guida dell'utente.

Per questo motivo sono nati dei corsi di guida che permettono di istruire i possessori di auto ibride plug-in su come ottenere il massimo delle prestazioni in termini di autonomia e consumi nei percorsi urbani, extraurbani e urbani [26].

Un altro aspetto da non sottovalutare quando si parla di auto ibride plug-in ed elettriche è il consumo di energia da parte degli accessori che, come vedremo, comporta una riduzione dell'autonomia della vettura.

Quando si parla di ibrido occorre tenere presente che questa tipologia di auto per poter reggere il confronto con le auto tradizionali in termini di offerta devono anche offrire tutti i confort e gli optional che l'utente si aspetta di avere a fronte della spesa sostenuta.

Tutti gli accessori e le utenze presenti a bordo di una vettura infatti determinano un fabbisogno energetico più o meno significativo sui consumi di una vettura. Nel caso delle auto tradizionali tali consumi possono sembrare irrilevanti, perché ne riducono l'autonomia di una quota relativamente bassa rispetto alla completa autonomia, mentre se consideriamo le auto ibride ed elettriche gli accessori fanno sicuramente la differenza.

I fattori che influiscono maggiormente sul consumo energetico di una vettura sono i seguenti:

- Massa;
- Modalità di trazione;
- Sistema di climatizzazione;
- Condizioni del traffico;
- Pendenze:
- Sistema di connettività della vettura;

Nei prossimi paragrafi verrà valutato il contributo dei singoli fattori sull'autonomia, sui consumi energetici e sulle emissioni.

4.5.1 Massa

Uno dei fattori che maggiormente incide sull'autonomia di una vettura è la massa. La massa di un veicolo consiste nella massa della vettura a secco (compresa di batterie), i passeggeri con l'eventuale carico e il carico di carburante nel serbatoio [27].

L'influenza della massa si ripercuote soprattutto negli spostamenti a basse velocità, in particolare nelle accelerazioni e sulla resistenza al rotolamento.

Nel caso di un'auto ibrida come l'auto di riferimento in questo studio il sistema motore elettrico + batteria comporta un aumento significativo della massa.

Nella tabella 4.3 è possibile quantificare il contributo del sistema ibrido sulla massa complessiva della vettura. Come vettura di confronto è stata considerata la versione della stessa auto che monta lo stesso motore termico tra quelle presenti nel listino.

Massa a vuoto* Plug-in [kg]	Massa a vuoto* auto tradizionale [kg]	
1615	1315	

^{*}la massa a vuoto viene calcolata considerando il conducente [75kg] con la vettura al 90% del serbatoio pieno.

Tabella 4.3: valori di massa a vuoto. Fonte [Scheda tecnica vettura].

Tra la versione ibrida e quella tradizionale vi è quindi una differenza di 300kg che corrispondono alla massa aggiuntiva dovuta al sistema ibrido composto da:

- motore elettrico + trasmissione circa 150kg corrispondente al 10% della massa complessiva della vettura;
- modulo batteria circa 125 Kg corrispondente all'8% della massa complessiva della vettura.
- Sistema di raffreddamento batteria circa 25kg;

Abbiamo visto nel paragrafo relativo alle batterie agli Ioni di litio che la densità energetica di queste batterie può arrivare a 300Wh/kg, in realtà a causa del complesso sistema di controllo e

gestione delle celle, la densità reale scende a valori molto bassi come in questo caso.

Il confronto tra le masse delle vetture ha senso solo se si considera anche la potenza erogata, questo però è valido esclusivamente per il tempo limitato alla durata della batteria che permette l'alimentazione del motore elettrico.

Una volta terminata la carica il motore elettrico smette di funzionare diventando passivo, a questo punto il motore termico si attiva per garantire la propulsione della vettura.

Rapporto peso potenza	Rapporto peso potenza	Rapporto peso potenza
auto plug-in batteria carica	auto plug-in batteria	auto tradizionale
[kg/kW]	scarica [kg/kW]	[kg/kW]
8,73	14,7	11,95

Tabella 4.4: rapporto peso potenza nelle diverse configurazioni.

La vettura ibrida, privata del contributo del suo motore elettrico, raggiunge un rapporto peso potenza che supera la versione tradizionale.

Questo comporta un sensibile aumento dei consumi come si può facilmente osservare guardando la tabella 4.5.

Consumo di carburante auto ibrida plug in batteria scarica [l/ 100 km]	Consumo di carburante auto ibrida plug-in in modalità carica batteria [l/100km]	Consumo di carburante auto tradizionale a benzina [l/ 100km]
6,5	≈10	6

Tabella 4.5: Consumi rilevati su tratto extra urbano

Addirittura se ci si trova a dover caricare la batteria con il motore endotermico i consumi salgono in maniera evidente, questa modalità dunque risulta essere un optional da utilizzare solo in situazioni estreme come ad esempio in previsione di un percorso in zone ZTL, quando lo SOC residuo non è sufficiente a garantire l'autonomia in modalità elettrica.

4.5.2 Modalità di Trazione

Il sistema scelto dalla casa automobilistica per la trasmissione della sua Ibrida Plug-in è un sistema ibrido parallelo [fig 4.3].

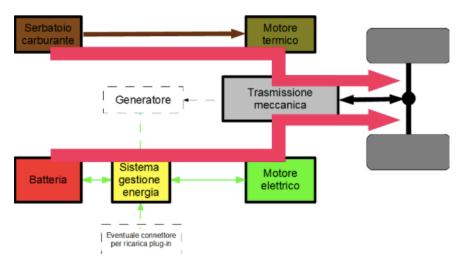


Figura 4.3: Schema di trazione ibrida paralello con flusso di potenza. Fonte: Green-start.

Secondo la filosofia di tale schema il motore elettrico supporta la trazione quando richiesto. In questo caso la strategia propulsiva scelta dalla casa automobilistica prevede per la vettura in esame quattro modalità di utilizzo:

- EV: La vettura procede utilizzando esclusivamente il motore elettrico fino ad esaurimento della batteria;
- Hybrid Auto: in questa modalità la trazione elettrica viene utilizzata quando richiesto, ad esempio nelle partenze a basse velocità o quando occorre effettuare un sorpasso in autostrada;
- Hybrid hold: la trazione rimane elettrica e il motore produce l'energia necessaria alla sua alimentazione;
- Hybrid charge: In questo caso il motore termico provvede alla ricarica, anche completa, delle batterie.

A seconda del tipo di utilizzo della vettura sarà conveniente utilizzare una modalità piuttosto che un'altra.

Vedremo più avanti come e quando sfruttare al meglio le modalità sopra elencate.

4.5.3 Temperatura esterna e condizionamento dell'aria

Le auto in generale risentono della temperatura ambiente la quale incide sui consumi, sia per l'utilizzo di utenze come climatizzatore e riscaldamento, sia per le condizioni di esercizio del motore.

Se le auto tradizionali risentono meno della temperatura di utilizzo (salvo in casi estremi), le auto

ibride ed elettriche ne sono più sensibili, in particolare a quelle basse, in quanto, oltre alla necessità di riscaldare l'abitacolo, le performance delle batterie agli ioni di litio dipendono dalla temperatura di utilizzo.

Come già accennato nel paragrafo dedicato, le batterie agli ioni di litio sono considerate uno dei migliori sistemi di immagazzinamento di energia per le auto elettriche ed ibride in virtù della densità energetica, il numero di cicli elevato, e il basso tasso di auto scarica [28].

Uno dei limiti di queste batterie è il range di utilizzo che va tra i -20°C e i 60°C [29].

Le basse temperature però determinano un aumento della resistenza al passaggio della corrente all'interno della batteria con conseguente aumento del consumo energetico e riduzione dell'autonomia.

Inoltre occorre considerare che per un'auto tradizionale il riscaldamento non richiede consumi aggiuntivi di carburante, in quanto l'aria calda proviene dal calore in eccesso prelevato dal sistema di raffreddamento del motore [30].

Questo significa che nei mesi invernali, per un'auto tradizionale, il riscaldamento comporta consumi aggiuntivi solo nel caso in cui è attivo il sistema di climatizzazione per deumidificare l'abitacolo.

Diversa è la situazione per i mesi estivi, quando il sistema di climatizzazione dell'aria richiede potenza addizionale prelevata dal motore per alimentare il compressore che porta a un aumento dei consumi di carburante, non in maniera percentuale, come si tende a generalizzare, ma che dipende dalla potenza della vettura, dalla temperatura esterna e dal tipo di compressore utilizzato [27].

A differenza delle auto tradizionali un'auto elettrica, o in questo caso ibrida in modalità EV, necessita di un sistema di riscaldamento dell'abitacolo alimentato dalla batteria che determina un consumo energetico significativo e quindi una riduzione dell'autonomia della vettura.

In compenso però le auto ibride ed elettriche non avendo bisogno del motore a combustione interna per riscaldare o condizionare l'abitacolo, possono effettuare il pre-riscaldamento in inverno, o il pre-condizionamento in estate, mentre sono ancora collegate alla presa elettrica senza quindi limitarne l'autonomia. Questo determina un aumento del comfort di queste vetture in quanto è possibile programmare la temperatura dell'abitacolo anche da remoto mediante applicativo su pc o smartphone.

Come accennato nella parte introduttiva, a partire dalle vetture mild-hybrid, vi è la tendenza dei costruttori, ai fini di migliorare l'efficienza energetica, di sostituire le utenze meccaniche collegate al motore, con degli azionamenti di tipo elettrico che si attivano esclusivamente quando richiesto e che a parità di potenza richiesta non comportano quindi perdite meccaniche aggiuntive. I nuovi

sistemi di condizionamento, per esempio, sostituiscono il collegamento meccanico che preleva potenza dall'albero motore, con un motore elettrico che aziona il compressore del sistema di climatizzazione. In questo modo la potenza generalmente richiesta dal compressore che si aggira attorno ai 2 kW [30], non risente delle perdite meccaniche dovute al tradizionale collegamento tramite cinghia-puleggia (da 4 a 8 %) [31].

In tabella 4.6 è possibile vedere alcuni esempi di come cambia l'autonomia in funzione della temperatura esterna:

Temperatura esterna [C°]	Temperatura interna [C°]	Climatizzazione/Risc aldamento [C°]	Km Percorsi in modalità EV [km]
-15	20	on	Modalità EV non disponibile
-2	20	on	18
2	20	on	19
20	20	off	30
25	20	on	25

Tabella 4.6: Valori di autonomia rilevati alle diverse temperature di utilizzo.

4.5.4 Percorsi e condizioni del traffico

I consumi di carburante e le emissioni di anidride carbonica sono fortemente influenzate dal percorso e dalle condizioni del traffico.

Un'auto che percorre una strada urbana avrà dei consumi più alti rispetto ad una che percorre una strada extra-urbana.

Nella tabella 4.7 è possibile valutare la differenza di consumi in relazione ai percorsi.

Consumo di energia su	Consumo di energia su	Consumo di energia su
percorso urbano	percorso extraurbano a 90	percorso extraurbano a 130
[kWh/km]	km/h [kWh/km]	km/h [kWh/km]
0,67	0,25	0,3

Tabella 4.7 Consumi di energia su diversi tipi di percorso

L'aumento dei consumi nei percorsi urbani è dovuto all'energia necessaria dovuta alle frequenti accelerazioni a cui è sottoposta la vettura quando si guida in città a causa di semafori, incroci o attraversamenti ciclabili e/o pedonali, nei percorsi extra urbani invece oltre una certa velocità aumentano i consumi a causa della resistenza aerodinamica.

Oltre al tipo di percorso, le variabili che incidono sensibilmente sul consumo di un'auto sono la condizione del traffico e il fenomeno dello stop-and-go.

Il fenomeno dello "stop and go", comune nei percorsi urbani durante gli orari di punta e in quelli extra urbani quando si verifica un incidente o un afflusso massiccio di auto in corrispondenza di caselli o cantieri stradali, è un fenomeno che determina oscillazioni del traffico che causa ripetuti cicli di accelerazione dei veicoli [32].

Sulle auto tradizionali lo stop-and-go comporta un consumo aggiuntivo di carburante che non viene recuperato in alcun modo. Nelle auto moderne, a partire dal sistema mild hybrid, in alcune condizioni del traffico, è possibile recuperare parte dell'energia spesa in accelerazione durante la fase di frenata grazie alla frenata rigenerativa, tale sistema se utilizzato in maniera efficace permette di recuperare circa il 20% di energia durante la frenata. [33]

4.5.5 Pendenza

Le pendenze del tratto stradale incidono significativamente sul consumo energetico della vettura. Forti pendenze determinano una riduzione significativa dell'autonomia complessiva (anche del 60%) di un'auto elettrica o ibrida.

Anche in questo caso però grazie al sistema di recupero energia che trasformano il motore elettrico in un generatore è possibile recuperare parte dell'energia persa su tratti a pendenza positiva durante i percorsi a pendenza negativa.

4.6 Valutazione delle performance di un'auto PHEV

In questa parte della trattazione verrà esaminato il caso di studio relativo all'utilizzo di un'auto ibrida PHEV con schema di trasmissione ibrido-parallelo su due diversi tipi di percorso, uno misto (urbano + extraurbano) ed uno esclusivamente urbano per le strade del centro città.

Si riportano nella tabella 4.8 le caratteristiche tecniche della vettura utilizzata:

Tipo di trazione Ibrida con schema di trazione in parallelo	
Tipo di motore termico Motore a ciclo Otto a 4 cilindri in linea con diretta di benzina, turbocompressore a gas e intercooler indiretto.	
Potenza motore elettrico	75 kW
Potenza motore termico	110 kW
Capacità serbatoio di carburante	40 1

Capacità batteria	8,8 kWh
Tipo di batteria	Ioni di Litio
Massa a vuoto	1615 kg
Massa batteria	125 kg
Densità energetica batteria	70 Wh/kg
Grado di ibridizzazione	0,4

Tabella 4.8: Caratteristiche tecniche vettura di riferimento

4.6.1 Percorso misto Urbano + extraurbano

In questo caso verrà preso in considerazione un utente che percorre mediamente un tragitto casalavoro e viceversa di circa 26,5 km, che risulta essere in linea con con la distanza media giornaliera percorsa pro-capite in Italia [34].

Il Percorso primo tratto è il percorso casa-lavoro di circa 13 km partendo dal quartiere San Paolo di Torino per arrivare alla zona commerciale di Moncalieri Fig 4.4:



Figura 4.4: Percorso casa-lavoro preso in esame nel caso di studio.

Il percorso selezionato prevede un mix di tratte urbane/extraurbane di seguito ripartite:

Percorso Totale	Percorso urbano	Percorso extra-urbano
[km]	[km]	[km]
13,2	4,7	8,5

Tabella 4.9: Ripartizione del percorso di riferimento.

Il tragitto casa-lavoro si divide in 35% percorso urbano e 65% percorso extraurbano. Si riportano di seguito i dati relativi ai tempi di percorrenza per il viaggio di andata in funzione delle fasce orarie di partenza.

Fascia di partenza	Velocità media [km/h]	Durata [min]	Mod EV Consumo	Mod EV SOC all'	Mod hybrid consumo carburante
			energetico	arrivo	e elettricità
			medio		[l]+[kWh]
			[kWh/km]		
05:30 - 07:00	57	14	0,27	60%	0,57 + 0,64
07:00 - 07:15	39	20	0,32	53%	0,63 + 0,74
07:15 - 07:30	36	21	0,32	52%	0,63 + 0,67
07:30 - 07:45	33	23	0,33	50%	0,66 + 0,73
07:45 - 08:00	33	23	0,33	51%	0,66 + 0,82

Tabella 4.10: Dati relativi al percorso di andata diviso per fasce orarie

Dai dati rilevati si vede come la differenza sulla stessa tratta percorsa in fasce orarie diverse può variare a 9 minuti di differenza durante il percorso di andata, tale differenza è da imputare alle condizioni del traffico.

Allo stesso modo anche i consumi energetici variano anche se in maniera differente in quanto il sistema di recupero energia in fase di frenata ha permesso di recuperare parte dell'energia spesa nelle fasi di accelerazione.

È molto importante sottolineare che le prove sono state effettuate durante il periodo invernale (tra dicembre 2017 e febbraio 2018) con una temperatura mediamente bassa durante le fasce orarie in esame (tra -5 °C e 6 °C). Come abbiamo visto in precedenza le batterie agli ioni di litio subiscono una riduzione delle performance alle basse temperature, ciò ha determinato una sensibile diminuzione dell'autonomia residua (tabella 4.10). A questo è da aggiungere il consumo da parte del sistema di riscaldamento per tenere la temperatura dell'abitacolo a 20°C.



Figura 4.5: Percorso lavoro-casa preso in esame nel caso di studio.

Il percorso lavoro-casa è analogo ma percorso in fasce orarie differenti tabella 4.11.

Percorso Totale	Percorso urbano	Percorso extra-urbano
[km]	[km]	[km]
13,2	4,9	8,3

Tabella 4.11: Ripartizione del percorso di riferimento. Dati calcolati da tabella in appendice

Il tragitto lavoro-casa si divide in 45% percorso urbano e 55% percorso extraurbano. Si riportano di seguito i dati relativi ai tempi di percorrenza per il viaggio di ritorno in funzione delle fasce orarie di partenza.

Fascia oraria di partenza	Velocità media [km/h]	Durata [min]	Mod EV Consumo energetico medio [kWh/km]	Mod EV SOC residuo all' arrivo	Mod hybrid consumo carburante e elettricità [l]+[kWh]
12:00- 13:00	43	18	0,24	64%	0,6 + 0,6
16:30 - 16:45	34	24	0,27	60%	0,65 + 0,73
16:45 – 17:00	34	23	0,25	62%	0,65 + 0,75
17:00 -18:30	30	28	0,28	58%	0,86 + 0,9

Tabella 4.12: Dati relativi al percorso per fasce orarie

La durata media del percorso di rientro risulta più lunga rispetto al percorso di andata, ciò è dovuto alle condizioni di traffico più intenso durante le fasce orarie considerate.

In questo caso l'autonomia residua al termine del viaggio di ritorno è sensibilmente più alta, nonostante le condizioni del traffico grazie anche alla temperatura esterna mediamente più alta durante le fasce orarie considerate [tra 7 °C e i 12 °C].

I dati riportati nelle tabelle 4.10 e 4.12 sono stati calcolati sulla base di rilevamenti telemetrici utilizzando il sistema GPS per il calcolo delle distanze e delle velocità medie e sono riferiti a giorni feriali con condizioni di viabilità non modificata a seguito di cantieri o incidenti stradali.

L'analisi dei dati ci permette di fare una prima importante considerazione relativa ai consumi.

Sulla base dei dati rilevati è possibile fare una valutazione economica ed energetica delle performance dell'auto ibrida plug-in utilizzata, verranno poi ipotizzati diversi scenari di utilizzo per capire meglio quali sono le condizioni ideali di utilizzo di questo tipo di vettura.

4.6.2 Valutazione economica delle performance.

A questo punto è doveroso affrontare uno dei temi più importanti nella valutazione delle performance dell'auto in esame ossia l'aspetto economico.

La valutazione economica terrà conto di due scenari, utilizzo dell'auto sempre in modalità EV e utilizzo dell'auto in modalità Hybrid.

Dato che le politiche di incentivazione a questo tipo di tecnologia sono su base regionale/comunale e non nazionale è difficile dare una valutazione oggettiva.

Per quanto riguarda il comune di Torino ad esempio l'unico incentivo all'utilizzo delle auto ibride ed elettriche è limitato alla possibilità di circolazione, previo permesso rilasciato a tariffe agevolate, in zone ZTL senza limiti di orario. Solo in alcuni comuni sono previsti come incentivo i parcheggi gratuiti anche sulle strisce blu.

Un altro provvedimento introdotto a livello regionale dalla regione Piemonte è quello dell'esenzione del bollo ma che riguarda solo vetture di potenza inferiore ai 100 kW.

Nella valutazione economica sono stati pertanto tenuti in considerazione i seguenti fattori:

- Costi di acquisto: riferito all'investimento iniziale per acquistare la vettura;
- Costi di utilizzo: riferiti al consumo di carburante e di corrente elettrica;

4.6.3 Confronto su percorso misto

A questo punto verrà esposto un confronto sul percorso di riferimento con altri modelli della stessa vettura alimentati a gasolio e a benzina di cui sono riportati i dati in tabella 4.13.

	Tradizionale diesel	Tradizionale a benzina
Motore [cc]	1598	1395
Potenza [kW]	81	110
Massa a vuoto [kg]	1360	1315

Tabella 4.13: vetture di confronto. Fonte: Scheda tecnica vettura.

I costi relativi al consumo di energia elettrica da parte della vettura sono stati calcolati considerando la carica domestica e quindi con un prezzo della quota variabile della corrente elettrica di 0,14 €/kWh al netto delle imposte [35].

Il prezzo dell'energia elettrica al kWh non considera la quota fissa in quanto l'utenza elettrica non è esclusiva dei proprietari di auto ibride ed elettriche e pertanto non viene conteggiata nel calcolo dei costi.

Il confronto è stato fatto considerando che le corrispettive auto tradizionali hanno consumato sul percorso di riferimento in media 6,25 l/100km a un prezzo medio di 1,434 €/l per il gasolio, mentre 7,7 l/100km a un prezzo medio di 1,550 €/l per quella a benzina.

Per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica sono state calcolate considerando 430g/kWh di emissioni per l'energia elettrica e 2,65 kg/l per il gasolio e 2,3 kg/l per la benzina [36].

In base ai dati rilevati sono stati ottenuti i seguenti risultati:

	Plug-in mod EV	Plug-in mod Hybrid	Tradizionale Diesel Euro 6	Tradizionale Benzina Euro 6
Consumo per 26,5 km	8 kWh	1,5 kWh + 1,3 l	1,66 1	21
Spesa per 26,5 km	€ 1,12 da rete domestica € 3,20 da rete pubblica	€ 2,2	€ 2,37	€ 3,10
CO ₂ [kg] per 26,5 km	3,44	3,64	4,4	4,6
CO ₂ anno* [kg] per 26,5 km	757	801	968	1012

Tabella 4.14: stima dell'impatto economico e ambientale sul percorso di riferimento.

Nella seguente tabella sono riportate delle stime dei costi sul percorso di riferimento confrontati con l'investimento iniziale per l'acquisto della vettura.

	Auto ibrida Plug-in mod EV	Tradizionale Diesel	Tradizionale benzina
Prezzo di Acquisto	€ 44.150	€ 30.950	€ 32.600
Costo al km con ricarica da utenza domestica*	€ 0,04	€ 0,09	0,12
Differenza percentuale rispetto Diesel	-55%	-	+33%
Differenza percentuale rispetto Benzina	-67%	-25%	-

Tabella 4.15: confronto percentuale dei costi al km.

La lettura dei dati in tabella 4.15 porta a concludere che da un punto di vista strettamente economico non ci sono (ad oggi) vantaggi reali nell'acquisto di quest'auto per un utente che percorre il tragitto considerato, a causa degli elevati costi di investimento iniziale non recuperabili sul lungo periodo salvo incrementi sostanziali del prezzo dei carburanti e diminuzione del costo dell'energia elettrica.

Percorrendo 26,5 km al giorno (considerando costante il prezzo dei carburanti e dell'energia elettrica) si risparmiano circa 1,25€ al giorno rispetto al diesel e 1,98€ rispetto alla benzina, che tradotto su base annua significa circa 275€ risparmiate rispetto al Diesel e 436€ rispetto alla benzina.

In base a questi numeri si riportano nella seguente tabella i valori di "beak eaven point":

Break eaven point Diesel	Break eaven Point Benzina
265.000 km	145.000 km

Per recuperare l'investimento iniziale, con i consumi rilevati sul percorso misto in 10 anni considerando 220 giorni lavorativi, bisognerebbe percorrere circa 120 km al giorno per recuperare l'investimento della vettura Diesel e 65 Km al giorno per quello della versione a Benzina. Questi

^{*} sono stati considerati 220 giorni lavorativi.

valori sono solo delle stime ma sono comunque indicative di quanta strada ci sia ancora da fare per raggiungere dei risultati concreti.

4.7 Percorso Urbano

A questo punto verrà considerato un percorso esclusivamente urbano tra le strade del centro di Torino.

In questo caso la velocità media durante il tragitto è molto bassa e le fasi di stop and go sono state frequenti, dovute sia alle condizioni del traffico che alle caratteristiche del percorso che prevedeva diversi attraversamenti pedonali e semafori.

Fascia oraria di percorre nza	Velocità media [km/h]	Durata [min]	Lunghezza percorso [km]	Mod EV SOC residuo all'arrivo	Mod EV Consumo energetico medio [kWh/km]	Mod EV Emissioni di CO ₂ [kg]
16:00- 18:00	10	73	12	5%	0,7	3,6

Tabella 4.16: Dati relativi al percorso urbano riferito a un giorno festivo.

Il percorso è stato selezionato per verificare l'autonomia e la funzionalità in condizioni di traffico intenso e in presenza di zone a traffico limitato. In questa situazione la vettura ha dimostrato di non essere particolarmente adatta al percorso cittadino perché ha permesso di percorrere circa 12 km con un pieno di energia di circa 8,36 kWh a un prezzo di circa 1,17€, quando ricaricata dalla rete domestica (0,14€/kWh) e di 3,4€, quando ricaricata dalle colonnine disponibili in centro città (il prezzo in questo caso è di 0,4 €/kWh) [35].

È inoltre evidente come la percorrenza del tragitto urbano determini un aumento significativo del consumo energetico della vettura e delle emissioni di CO₂.

Una volta terminata la carica la vettura ha permesso il rientro a casa grazie al motore termico, quest'aspetto ha permesso di limitare la "Range Anxiety" tipica delle auto esclusivamente elettriche a discapito dei consumi di carburante.

Considerando che le corrispettive auto a gasolio e a benzina hanno registrato delle percorrenze rispettivamente di 12 Km/l e 9 Km/l per la benzina si riporta in tabella il confronto dei costi al km:

	Auto ibrida Plug-in	Tradizionale Diesel	Tradizionale
	[€/km]	[€/km]	benzina [€/km]
Percorso urbano	0,10 € da rete domestica 0,352 € da rete pubblica		€ 0,17

Tabella 4.17: confronto dei costi su percorso urbano

Capitolo V

Prospettive future sul contributo delle auto PHEV alla mobilità urbana.

Abbiamo visto nei capitoli precedenti che la ricerca sulle auto PHEV ha ancora molta strada da percorrere per poter competere con le auto tradizionali e che alcuni degli attuali prodotti in commercio possono rivelarsi in particolari condizioni addirittura peggiori in termini di inquinamento e consumi.

Nei prossimi paragrafi partendo da studi sul contributo del traffico all'inquinamento del centro città, andremo a valutare come ottenere dei reali benefici dall'introduzione di architetture PHEV all'interno del circuito urbano in particolare del centro città.

5.1 Contributo del traffico all'inquinamento del centro città

L'inquinamento dei centri urbani è un problema che attribuiamo alla nostra civiltà industriale, al traffico e ai riscaldamenti ma che in realtà ha origini molto lontane.

L'uomo ha iniziato a inquinare l'atmosfera con le polveri sottili da quando ha scoperto l'uso del fuoco.

Seneca nelle sue lettere a Lucilio scriveva di quanto fosse fastidiosa per lui l'aria della città di Roma:

"Ut primum gravitatem urbis excessi et illum odorem culinarum fumantium quae motae quidquid pestiferi vaporis sorbuerunt cum pulvere effundunt, protinus mutatam valetudinem sensis. (Appena ebbi lasciata l'aria pesante della città e quell'odore di cucine fumanti che, una volta al lavoro, effondono con la polvere tutto quel vapore pestifero che hanno assorbito, subito ho sentito un cambiamento nel mio stato di salute)"cit. [37].

Con l'avvento della rivoluzione industriale e dell'industrializzazione spinta, la situazione è peggiorata fino ad arrivare agli anni '50, esattamente nel 1952, quando a Londra si verificò l'episodio che cambiò definitivamente la percezione dell'inquinamento ovvero il "great smog" in cui morirono in soli 4 giorni circa 4000 abitanti a causa della coltre di fumo che avvolse la città.



Figura 5.1: The great smog London 1952. Fonte: Old london

Da allora iniziarono una serie di provvedimenti atti a ridurre le emissioni di sostanze inquinanti nei centri urbani.

Quelle che sono sicuramente cambiate nel tempo sono le sostanze inquinanti, grazie anche all'evoluzione tecnica dei motori e dei mezzi di trasporto in generale, e alla consapevolezza dei rischi per la salute derivanti dall'esposizione all'inquinamento.

Nel complesso come abbiamo visto nel capitolo 2 i livelli di sostanze inquinanti è diminuito negli anni ma per rimanere sotto i limiti stabiliti dalle normative a tutela della salute occorre fare ancora tanto e su più fronti.

All'inquinamento nei centri urbani contribuiscono:

- i trasporti con i motori a combustione interna, l'usura pneumatici, il ferodo dei freni, il passaggio su strada;
- i sistemi di riscaldamento specialmente alimentati a biomasse e a gasolio;
- i forni a legna di pizzerie e ristoranti;
- la produzione industriale;
- L'agricoltura e l'allevamento;

A livello normativo il decreto legislativo n.155 del 13 agosto 2010 [38] recepisce la direttiva europea 2008/50/CE [39] e oltre a stabilire quali sono i valori limite delle sostanze ritenute inquinanti (tabella 5.1) ne specifica le modalità di misurazione, per limitare l'esposizione prolungata a sostanze ritenute nocive alla popolazione, alla vegetazione e all'ecosistema in generale.

INQUINANTE	NANTE PERIODO DI MEDIAZIONE		VALORE LIMITE	
Biossido di zolfo	Orario (non più di 24 volte all'anno)	350	μg/m³	
Biossido di 20110	Giornaliero (non più di 3 volte all'anno)	125	μg/m³	
Biossido di azoto	Orario (per non più di 18 volte all'anno)	200	μg/m³	
Biossido di azoto	Annuo	40	μg/m³	
Benzene	Annuo	5	µg/m³	
Monossido di carbonio	Media max giornaliera su 8 ore	10	mg/m³	
Particolato PM 10	Giornaliero (non più di 35 volte all'anno)	50	μg/m³	
	Annuo	40	μg/m³	
Particolato PM 2.5	Annuo al 2010 (+MT) [valore di riferimento]	29	μg/m³	
	Annuo al 2015	25	μg/m³	
Piombo	Anno	0.5	µg/m³	

Tabella 5.1 Valori limite per le sostanze inquinanti secondo il DDL del 13 agosto 2010.

Il traffico motorizzato è sicuramente uno degli attori principali in questo contesto sia per l'emissione di sostanze inquinanti quali monossido di carbonio, biossido di zolfo e biossido di azoto ma anche per quanto riguarda l'emissione di particolato primario, cioè quello derivante dai gas di scarico, dall'usura degli pneumatici, dalla pulizia delle strade e da altre sorgenti volatili e di particolato secondario, cioè derivante da reazioni chimiche che avvengono nell'atmosfera.

Valutare quantitativamente l'impatto delle automobili sull'inquinamento dei centri urbani è una tematica estremamente complessa in quanto non è facile stabilire esattamente tutte le sorgenti.

Da uno studio condotto dall'RSE (Ricerca Sistema Energetico) sull'inquinamento dell'area Padana solo il 30-35% delle polveri sottili PM2.5 viene prodotto in città e la restante parte invece viene importata dall'hinterland e dalle campagne circostanti [40].

Sempre secondo l'RSE le auto sarebbero responsabili di circa il 14% delle PM2.5 medie registrate nei centri di città come Milano e Torino, di cui solo l'8% sarebbero prodotte dalle auto circolanti in città, mentre il restante 6% proviene da fonti veicolari extra-urbane, di cui: 2% dalle auto circolanti nella provincia, 3% da auto circolanti nella regione e 1% da auto circolanti nelle regioni limitrofe [41].

Alle auto si aggiungono gli altri trasporti su strada che sono responsabili di circa il 13% dell'emissione di PM2.5 portando dunque il totale per il settore trasporti a una quota di circa il 30% delle concentrazioni medie annue (figura 5.3).

Si riportano in figura 5.2 i valori medi di PM2.5 derivanti dal trasporto su strada per diverse aree urbane ed extraurbane della pianura Padana tra cui la città di Torino:

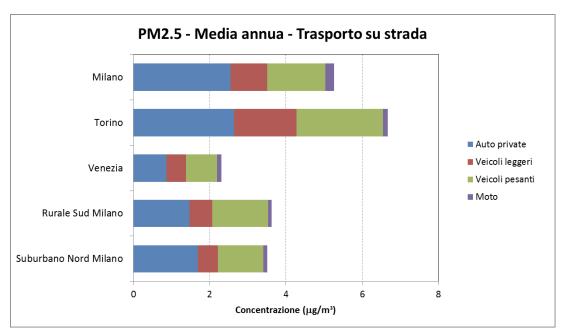


Figura 5.2: valori medi di PM2.5 derivanti dal trasporto su strada per diverse aree urbane ed extraurbane.

Fonte: RSE

Dalla lettura della figura 5.2 è possibile notare come la città di Torino sia quella con i più alti valori di PM2.5 tra quelli registrati.

Una delle cause da attribuire a questo dato è sicuramente l'assenza di una rete metropolitana efficiente come nel caso della città di Milano.

Questo aspetto è fondamentale per capire l'importanza del trasporto pubblico per contribuire alla riduzione delle emissioni, considerando che la città di Milano ha un numero di abitanti maggiore del 35% rispetto a quelli di Torino [42].

Un aspetto molto importante da sottolineare riguarda l'obsolescenza del parco auto. Per ridurre le emissioni inquinanti derivanti dai motori a combustione interna infatti basterebbe sostituire tutte le auto, a partire da Euro 0 fino agli Euro 4, con i più moderni Euro 5 e Euro 6.

Le restanti quote invece sono da attribuirsi ad altri fattori emissivi quali riscaldamento, produzione di energia, sorgenti naturali e sorgenti estere. In figura 5.3 sono riportati i valori medi di PM2.5 rilevati in alcune città italiane, tra cui la città di Torino, dove è possibile trovare la stima dei contributi dei singoli fattori di emissione.

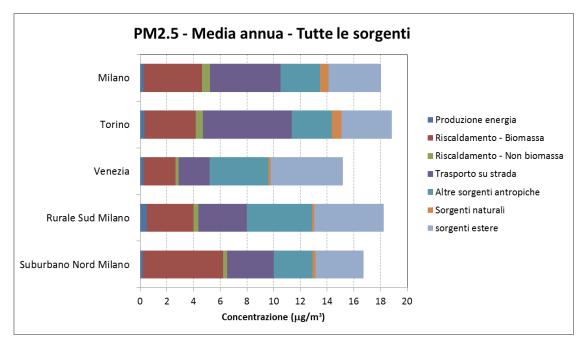


Figura 5.3: stima dei contributi emissivi di PM2.5 in diverse aree urbane ed extraurbane. Fonte: RSE

I fattori da considerare nello studio dell'inquinamento sono dunque molteplici e, come si è osservato negli ultimi anni, sono aggravati da fattori meteorologici e stagionali quali l'assenza di precipitazioni e il fenomeno dell'inversione termica che si manifesta in particolar modo nel periodo invernale.

Da queste considerazioni viene facile concludere che il traffico motorizzato sia solo una parte del problema e che occorre dunque agire su più fronti per poter rendere i centri urbani più vivibili. Ipotizzando di convertire l'intero parco auto circolante nei centri urbani da tradizionali in PHEV

si potrebbero avere dei benefici sulla qualità dell'aria, che come abbiamo visto si potrebbero quantificare con la riduzione dell'8% delle polveri sottili [41], ma per farlo la sola conversione non basta. Come abbiamo visto nel capitolo 4, le performance di queste auto non sempre sono ottimizzate a ridurre consumi ed emissioni specialmente nel traffico urbano dove i valori di autonomia di queste auto sono molto limitati.

Alla luce dei dati analizzati durante il lavoro di tesi si è giunti alla conclusione che è necessario adottare delle misure che permettano di ottenere una reale riduzione delle sostanze inquinanti nei centri urbani con l'utilizzo delle auto PHEV.

Nei successivi paragrafi verranno illustrate le misure da adottare per ottimizzare l'uso delle auto PHEV e sfruttare a pieno le potenzialità ottenendo dei reali benefici in termini di consumi energetici, costi ed emissioni.

5.1.1 Ottimizzazione dell'architettura PHEV al traffico urbano

Come abbiamo visto nel capitolo 4 le attuali proposte in commercio non sempre sono ottimizzate a percorrere circuiti cittadini soprattutto nelle zone centrali dove il traffico è generalmente congestionato.

Per avere un'auto PHEV che permetta realmente di contribuire a ridurre l'inquinamento nel centro città garantendo sicurezza e autonomia, occorre un'architettura che abbia innanzitutto massa e dimensioni contenute (es. categoria A), per poter ridurre i consumi energetici dovuti alle frequenti ripartenze e avere un pacco batterie tale da garantire un'autonomia di circa 60 km per non avere necessità dell'utilizzo del motore termico per poter circolare.

I 60 km garantiscono all'utente di circolare in modalità elettrica anche quando, in situazioni particolari, non fosse possibile ricaricare l'auto tutti i giorni o semplicemente per evitare la cosiddetta "charge & range anxiety" che limita la diffusione dei veicoli elettrici.

Il motore termico dovrebbe essere un motore di piccole dimensioni con una potenza specifica tale da garantire la trazione dell'auto in situazioni di necessità, ad esempio da "range extender" quando la batteria è scarica, e non deve essere pertanto dimensionato come un motore primario.

Lo schema di trazione in parallelo può essere ottimizzata su queste vetture installando la trazione elettrica con i suoi componenti, tra cui la batteria e il motore, sull'assale posteriore fornendo quindi la coppia motrice alle ruote posteriori nel caso di trazione completamente elettrica e installare il motore termico seguendo lo schema tradizionale della trazione anteriore.

Questo permetterebbe di sfruttare all'occorrenza i benefici della trazione integrale, ad esempio se si percorrono strade di montagna o di collina o in condizioni di manto stradale scivoloso, pur non avendo collegamento diretto tra i due assali.

5.1.2 Controllo degli ingressi alle ZTL

Il comune di Torino prevede delle aree ad accesso limitato in diverse zone del centro città come illustrato in figura 5.4.

Per garantire che l'utilizzo delle auto ibride contribuisca effettivamente a migliorare la qualità dell'aria dei centri urbani, è necessario regolamentare gli accessi alle zone a traffico limitato (ZTL) anche per questo tipo di auto.



Figura 5.4: Zone a traffico limitato nella città di Torino. Fonte: Comune di Torino

Al momento il controllo delle ZTL viene eseguito mediante sistema automatico basato su telecamere che rilevano la targa della vettura e la confrontano con quelle inserite nel database. Se la vettura non è autorizzata al transito nella ZTL viene emessa una contravvenzione.

Come accennato in precedenza, per incentivarne la vendita, il comune di Torino permette a alle auto ibride immatricolate dal 2015 e con emissioni dichiarate non superiori ai 110g/km di circolare, previa autorizzazione, a tariffe agevolate nelle zone a traffico limitato senza vincoli di orario.

Al momento però il sistema presenta dei punti aperti, infatti l'accesso alle ZTL per queste auto è consentito senza controllo dell'utilizzo o meno del motore termico. Questo significa che paradossalmente un'auto ibrida con batteria scarica con motore termico acceso e in fase di carica della batteria (che ha consumi di carburante nell'ordine dei 14 l/100 km) può liberamente circolare in centro mentre un'auto con consumi ridotti ma con architettura tradizionale non può.

Questo aspetto deve esser dunque regolato per poter migliorare realmente la qualità dell'aria nei centri urbani.

Una possibile soluzione a questo problema potrebbe essere quella di sfruttare il sistema di connettività /infotainment che preleva le informazioni relative al tipo di trazione dalla linea CAN della vettura e le comunica a dei lettori posti nelle zone a traffico limitato per verificare che l'auto effettivamente stia procedendo in modalità elettrica.

Un'ulteriore ottimizzazione del sistema potrebbe essere quella di far passare automaticamente l'auto alla trazione elettrica, qualora fosse in modalità tradizionale, e avvisare il conducente se il livello della batteria risultasse troppo basso per poter circolare in zona a traffico limitato.

Altre soluzioni potrebbero prevedere l'utilizzo di telecamere termiche per verificare la temperatura del motore o dello scarico dell'auto per valutare l'utilizzo del tipo di trazione. In questo caso però risulterebbe difficile gestire situazioni limite in cui ad esempio il guidatore passa alla trazione elettrica proprio in prossimità dei punti di controllo, in quel caso il motore termico risulterebbe ancora caldo e ci sarebbe dunque il rischio di ricevere sanzioni contestabili.

Soluzioni di questo tipo richiedono uno studio dedicato.

5.1.3 Introduzione del limite a 30 km/h nelle zone ZTL

La velocità delle auto nei centri urbani, seppur già ridotta a causa della congestione del traffico, ha importanti ripercussioni sulla qualità dell'aria.

L'introduzione del limite di velocità a 30 km/h avrebbe dei molteplici benefici sia sulla qualità dell'aria che sulla mobilità in generale delle auto PHEV.

Le basse velocità infatti permettono innanzitutto alle auto di limitare le accelerazioni, che come abbiamo visto comportano una riduzione sostanziale dell'autonomia della vettura. Inoltre la velocità costante a 30 km/h permetterebbe di utilizzare motori elettrici funzionanti anche a tensioni basse es. 48 V ed utilizzare architetture studiate ad hoc per la mobilità urbana.

Abbiamo visto infatti che per ottenere dei risultati soddisfacenti in termini di autonomia è necessario ridurre la massa complessiva del veicolo senza però sacrificare sicurezza e comfort.

Da queste considerazioni nasce l'idea di utilizzare per il trasporto turistico e non solo, nei centri urbani delle architetture molto semplici che prendono spunto dai risciò utilizzati nel sud est asiatico o dai caddy usati sulle piste da golf.

Nella tabella si riportano le caratteristiche tecniche di massima della vettura:

Massa a vuoto	400 kg
Massa a lordo	600 kg
Tipo di batteria	Ioni di Litio
Tensione di alimentazione	48V
Potenza motore elettrico	15 kW
Capacità batteria	4 kWh
Massa batteria	20 kg

Tabella 5.1: Dati tecnici vettura elettrica per mobilità urbana.

Auto di questo tipo possono sfruttare motori elettrici alimentati a 48V e grazie alla massa contenuta della batteria, che non necessita di tutte le precauzioni richieste dalle batterie ad alto voltaggio, e che consente di avere una densità energetica di circa 200 Wh/kg, è possibile utilizzare il servizio di "battery swapping" e quindi sostituire la batteria scarica con una carica in un tempo

paragonabile a quello di un rifornimento di carburante.

Una vettura di questo tipo, ottimizzata per gli spostamenti urbani, permette di avere un consumo di circa 100 Wh/km e quindi un'autonomia di 40 km in modalità elettrica.

Se si considerano circa 12 missioni giornaliere da 10 km ciascuna per un totale di 120 km, l'autonomia di questa auto permetterebbe di completare le missioni giornaliere con sole due sostituzioni di batteria.

Per poter avere la possibilità di completare le missioni giornaliere senza effettuare rifornimenti è necessaria una batteria da 12 kWh con una massa di 60 kg. Le tempistiche di ricarica in questo caso ammonterebbero a circa 5h considerando la ricarica domestica lenta a 2,3 kW e che scendono a 3h se si effettua la ricarica rapida a 3,7 kW.

Un altro aspetto da non sottovalutare è quello della sicurezza, uno dei problemi principali legati all'utilizzo di auto alimentate elettricamente come nel caso delle auto PHEV in modalità elettrica è l'assenza del rumore del motore a combustione a cui siamo abituati nel traffico tradizionale.

Le soluzioni a questo problema sono ancora in fase di ricerca tra cui alcune che prevedono l'utilizzo di avvisatori acustici per segnalare la presenza di queste vetture, questo però limiterebbe uno dei vantaggi derivanti dall'uso dei motori elettrici e cioè quello di ridurre l'inquinamento acustico. Limitando la velocità a 30 km/h aumenterebbe la sicurezza di queste auto riducendo il numero degli incidenti e degli investimenti di pedoni e ciclisti nelle aree del centro città.

Un altro fattore che influisce alla dispersione delle polveri sottili nell'aria è il passaggio delle vetture che determina l'aumento del rimescolamento delle polveri. Riducendo la velocità si riduce il flusso di polveri sollevate dal passaggio delle auto.

5.1.4 Car Sharing e car pooling.

Al fine di rendere la tecnologia delle auto PHEV accessibile a tutti, e quindi limitare il problema legato ai costi di acquisto elevati di queste auto, sarebbe utile creare un parco auto destinato all'utilizzo nel centro città con la modalità del "car sharing".

La diffusione del "car sharing", come del resto delle auto PHEV ed elettriche in generale, richiede l'ampliamento delle infrastrutture di ricarica per avere a disposizione una rete di ricarica distribuita uniformemente ed evitare di poter parcheggiare l'auto solo in determinate zone limitando gli utenti. Ad oggi sono già presenti in alcuni comuni tra cui quello di Torino dei servizi di auto completamente elettriche in modalità di "car sharing" ma questi servizi sono ancora limitati a poche zone e soprattutto non ci sono le infrastrutture necessarie all'utilizzo massivo di questo tipo di auto.

Oltre al "car sharing" occorre incrementare il numero di passeggeri per automobile facendo magari

ricorso al "car pooling".

Secondo uno studio dell'ANCI (Associazione Nazionale Comuni Italiani) circa i due terzi delle auto circolanti nelle città metropolitane, che ammontano a circa 1.200.000, viaggia con un solo conducente. Questo significa che se si riuscisse a portare a 2 il numero di passeggeri per vettura si ridurrebbero di circa 680.000 unità le auto in circolazione [43].

Quello che si potrebbe fare per incrementare il numero di passeggeri per vettura è sviluppare un servizio che sfrutti la tecnologia del sistema di connettività delle auto PHEV per permettere di pianificare un percorso e di condividerlo con altri utenti come avviene già per gli spostamenti a lunga percorrenza.

Conclusioni

Nella presente trattazione l'obiettivo è stato quello di valutare le performance di un'auto ibrida Plug-in e capire se possiede realmente le potenzialità per limitare l'inquinamento dei centri urbani, garantire l'autonomia sulle lunghe distanze e ridurre i consumi energetici.

In questo lavoro di tesi, dopo una breve panoramica sulle problematiche relative alla qualità dell'aria e al contributo ambientale delle auto tradizionali, è stato analizzato in breve il processo di evoluzione che porta un'auto tradizionale a diventare elettrica con particolare attenzione alle vetture ibride Plug-in.

In seguito è stato riportato lo stato dell'arte relativo ad alcuni studi sulle auto ibride plug-in.

Nella parte centrale del lavoro di tesi è stato condotto un caso di studio con prove reali effettuate utilizzando un'auto ibrida plug-in su due tipi di percorso, misto e urbano analizzando nel dettaglio le performance della vettura.

Nella parte finale, utilizzando i dati relativi a studi condotti sul contributo del traffico motorizzato all'inquinamento dei centri urbani, sono stati analizzati i potenziali contributi delle auto PHEV alla riduzione delle polveri sottili nelle aree del centro urbano indicando quali misure sono necessarie per sfruttare a pieno i benefici di queste auto.

Dall'analisi dei risultati, in merito all'utilizzo di un'auto ibrida PHEV su due tipi di percorso (urbano e misto), è possibile formulare le conclusioni che seguono.

Le soluzioni tecniche adottate dalla casa automobilistica, nel caso dell'auto utilizzata nelle prove, non sono ottimizzate per l'architettura ibrida, in quanto la massa complessiva dell'auto di circa 1615 kg è stata incrementata del 25% rispetto al corrispettivo modello alimentato a benzina, a discapito dell'autonomia complessiva dell'auto.

La massa dell'auto e il consumo energetico da parte degli accessori tra cui riscaldamento, sistema infotainment e di illuminazione, hanno ridotto l'autonomia della vettura a circa 32 km sul percorso misto e a soli 12 km sul percorso urbano nelle strade del centro città, a causa delle frequenti ripartenze che ne hanno ridotto l'autonomia.

A contribuire alla riduzione dei km percorsi sono state complici le temperature invernali le quali influiscono negativamente sulla chimica delle batterie agli ioni di litio aumentandone i consumi energetici.

I valori di autonomia registrati hanno influito negativamente anche sulla valutazione dei costi. Nello specifico un pieno di Energia elettrica per questa vettura, che ha un pacco batterie agli ioni di litio con capacità 8,8 kWh, costa circa 1,232€ con un prezzo medio di 0,14 kWh (prezzo materia energia) ricaricata utilizzando l'utenza domestica e 3,52€ ricaricata dalle colonnine presenti in

centro città a un prezzo di 0,40€/kWh.

Nel complesso si riportano i seguenti risultati:

Percorso (km	PHEV [€/km]	Gasolio [€/km] (1,434	Benzina [€/km] (1,550 €/l)
percorsi in mo-		€/I)	
dalità EV)			
Misto (26,5)	0,04 domestica*	0,09 (16 km/l)	0,12 (13 km/l)
	0,11 pubblica**		
Urbano (12 km)	0,10 domestica*	0,12 (12 km/l)	0,17 (9 km/l)
	0,352 pubblica**		

Tabella 6.1: riassunto dei costi/km su diversi tipi di percorso.

Dai risultati ottenuti è possibile notare come una soluzione tecnica di questo tipo non risulta essere particolarmente adatta ai percorsi urbani dove si sono registrati i valori di autonomia inferiori dovuti alle condizioni del percorso e alle caratteristiche dell'auto.

La ricerca di un'auto a basso impatto ambientale deve focalizzarsi dunque sul tipo di percorso a cui è destinata per raggiungere degli obiettivi concreti.

L'auto utilizzata nello studio ha dimostrato di avere diversi aspetti da migliorare per poter fare fronte ai temi ambientali e soddisfare contemporaneamente le esigenze dei clienti.

Questo aspetto è comunque comune a diversi produttori i quali, a seguito dei recenti scandali sulle emissioni, si sono ritrovati ad investire su un campo ancora inesplorato.

Possiamo quindi pensare ad auto di questo tipo quindi come il risultato di una forzatura del mercato che deve rispondere ai trend del momento.

Solo i produttori che hanno intrapreso la strada dell'elettrificazione in anticipo sono arrivati ad avere dei risultati in parte positivi.

Questo dimostra che la strada è ancora lunga e costruire automobili a basso impatto ambientale non è facile e richiede tanti anni di ricerca e sviluppo considerando anche il fatto che occorre far fronte alle esigenze dei clienti, delle città e della mobilità in generale le quali sono in continua evoluzione.

Per quanto riguarda gli effetti sulla mobilità motorizzata urbana possiamo affermare con certezza che i centri urbani si aspettano dalle auto PHEV un contributo al miglioramento della qualità dell'aria ma per farlo convertire le auto tradizionali in ibride plug-in non basta. Dall'analisi delle performance delle auto ibride plug-in è possibile concludere che per sfruttare a pieno le

^{*}Domestica = 0,14 €/kWh

^{**} Pubblica = 0,4 €/kWh

potenzialità di queste auto sono necessari degli interventi mirati.

Al fine di ottimizzare l'uso delle auto PHEV per i percorsi urbani occorre un'architettura di tipo in parallelo che abbia innanzitutto massa e dimensioni contenute (es. categoria A), per ridurre i consumi energetici dovuti alle frequenti ripartenze, e che abbia un pacco batterie tale da garantire un'autonomia di circa 60 km, per non avere necessità dell'utilizzo del motore termico.

Un'autonomia di 60 km garantisce all'utente di circolare in modalità elettrica anche quando non è possibile ricaricare l'auto tutti i giorni, o semplicemente per evitare la cosiddetta "range anxiety" che limita la diffusione di veicoli elettrici.

Il motore termico dovrebbe essere un motore di piccole dimensioni con una potenza specifica tale da garantire la trazione dell'auto in situazioni di necessità, ad esempio da "range extender" quando la batteria è scarica, e non deve essere dunque dimensionato come un motore primario.

Lo schema di trazione in parallelo potrebbe essere ottimizzata per adattarsi alle esigenze della mobilità urbana installando la trazione elettrica con i suoi componenti, tra cui la batteria e il motore, sull'assale posteriore fornendo la coppia motrice alle ruote posteriori. Per quanto riguarda l'assale anteriore invece, si potrebbe lasciare il motore termico nella configurazione tradizionale fornendo la coppia motrice quando necessario alle ruote anteriori.

Questo permetterebbe di sfruttare all'occorrenza i benefici della trazione integrale ad esempio se si percorrono strade di montagna o di collina o in condizioni di manto stradale scivoloso, pur non avendo collegamento diretto tra i due assali.

Per poter sfruttare i benefici derivanti dalla trazione elettrica occorre regolamentare con criterio l'accesso alle ZTL. Gli attuali regolamenti permettono alle auto ibride di circolare nelle zone a traffico limitato a tariffe agevolate senza limiti di accesso non considerando l'effettivo utilizzo della trazione elettrica.

Questo aspetto può risultare in contraddizione con l'obiettivo delle ZTL di limitare il traffico e migliorare la qualità dell'aria. Infatti come abbiamo visto durante le prove su strada, in caso di utilizzo del motore endotermico, l'auto PHEV è risultata essere addirittura più inquinante rispetto alle corrispettive versioni tradizionali.

Future ricerche potrebbero essere indirizzate a valutare l'ingresso nelle ZTL utilizzando dei sistemi di controllo telematici che permettano un efficiente controllo del traffico come ad esempio:

Sfruttare il sistema di connettività /infotainment che preleva le informazioni relative al
tipo di trazione dalla linea CAN della vettura e le comunica a dei lettori posti nelle zone
a traffico limitato per verificare che l'auto effettivamente stia procedendo in modalità
elettrica;

- Far passare automaticamente l'auto alla trazione elettrica, qualora fosse in modalità tradizionale, e avvisare il conducente se il livello della batteria risultasse troppo basso per poter circolare in zona a traffico limitato;
- Utilizzare telecamere termiche per verificare la temperatura del motore o dello scarico dell'auto per valutare l'utilizzo del tipo di trazione.

Un altro intervento molto importante che si sposa con la filosofia PHEV, è quello della velocità massima consentita.

Riducendo a 30km/h la velocità massima consentita nei centri urbani si otterrebbero ulteriori benefici:

- Riduzione ulteriore delle polveri sottili grazie alla riduzione del particolato sollevato dal passaggio delle auto;
- Incremento dell'autonomia grazie alle ridotte accelerazioni necessarie;
- Possibilità di utilizzare auto elettriche alimentate con batterie a 48V e sfruttare il "Battery Swaping";
- Incremento di autonomia e sicurezza grazie alla possibilità di utilizzare motori elettrici a bassa o a media tensione;
- Diminuzione degli investimenti di pedoni causati dell'assenza del rumore tipico delle auto tradizionali;

Infine abbiamo visto che uno degli aspetti più limitanti alla diffusione delle auto ibride plug-in è quello economico a causa degli elevati costi di acquisto. Per poter superare questo scoglio e permettere a tutti di usufruire di queste auto si potrebbe pensare a una flotta condivisa in "car sharing" da utilizzare nel centro città, integrando le infrastrutture di ricarica per permettere di collegare facilmente le auto alla rete elettrica, senza necessità di dover selezionare le aree di parcheggio limitando così la mobilità.

Riferimenti bibliografici

- [1] http://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/annuario-statistico.html.
- [2] ISPRA, Annuario sullo stato dell'ambiente. Ispra, 2016.
- [3] ARPA, Rapporto sullo stato dell'ambiente 2017. ARPA, 2018.
- [4] TERNA, Dati Statistici sull'Energia Elettrica in Italia Anno 2016. TERNA, 2017.
- [5] O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.) Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2014.
- [6] G. Genta. Lectio Magistralis, Politecnico di Torino, febbraio 2018.
- [7] Leman, A. Jajuli, D. Feriyanto, F. Rahman and S. Zakaria. *Advanced Catalytic Converter in Gasoline Enginer Emission* Control: A Review. DP Sciences, 2017.
- [8] Boston Consoulting Group. *The Electric Car Tipping Point Research highlights*. The Boston Consoulting Group, 2017.
- [9] J. Larminie, J. Lowry. *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons, Incorporated 2012.
- [10] M. Cossale. *Multi-phase Starter-Generator for 48 V Mild-Hybrid Powertrains*. PhD thesis 2017.
- [11] M. Ehsani, Y. Gao, A. Emadi. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design* (in inglese), 2^a ed., CRC Press, 2009.
- [12] R. Folkson. *Alternative fuels and advanced vehicle technologies for improved environmental performance*. Elsevier, 2014.
- [13] A.E. Catania, E. Spessa, V. Paladini, A. Vassallo. *Fuel Consumption and Emissions of Hybrid Diesel Application*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2008.
- [14] F. Millo, L. Rolando, R. Fuso, F. Mallamo. *Real CO₂ emissions benefits and end user's operating costs of plug-in Hybrid Electric Vehicl*. Applied Energy Elsevier, 2014.
- [15] M.Hernandez, M. Messagie, O.Hegazy, L.Marengo, O.Winter, J. Van Mierlo. *Environmental impact of traction electric motors for electric vehicle application*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.

- [16] Z. Li, L. Chen, S. Xu, Y. Qian. Analitical studies of CO₂ emission in a mixed traffic flow with different vehicles. Elsevier, 2014.
- [17] C. Silva, T. Farias. Evaluation of Energy Consuption, Emissions and Costs of Plug-in Hybrid Vehicles. Elsevier, 2010.
- [18] G. Pistoia. Lithium-Ion Batteries Advances and Applications. Elsevier, 2014.
- [19] A.Perner, J.Vetter. *Lithium-ion batteries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicle*. Elsevier, 2015.
- [20] Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability. McKinsey&company, 2017.
- [21] B.Lunz, D.U.Sauer. *Electric road vehicle battery charging systems and infrastructure*. Elsevier, 2015.
- [22] B. Chokkalingam, S. Padmanaban, P. Siano, R. Krishnamoorthy and R. Selvaraj. *Real-Time Forecasting of EV Charging Station Scheduling for Smart Energy Systems*. MDPI, 2017.
- [23] TERNA. dati provvisori di esercizio del sistema elettrico nazionale TERNA S.P.A. E gruppo TERNA, 2016.
- [24] ICCT Briefing. Ensuring driving on electricity is cheaper than driving on gasoline. ICCT, 2018.
- [25] Ligterink, N. & R.A. Eijk, Arjan. *Real-World Fuel Consumption of Passenger Cars*. Research Gate, 2014.
- [26] http://www.gruppoacquistoibrido.it/corso-guida-ibrida.
- [27] G.Fontaras, N.G. Zacharof, B. Ciuffo, Fuel consumption and CO₂ emissions from passenger cars in Europe Laboratory versus real-world emissions, Elsevier, 2017.
- [28] S. Goriparti, E. Miele, F. De Angelis, E. Di Fabrizio, R.P. Zaccaria, C. Capiglia. *Review on recent progress of nanostructured anode materials for Li-ion batteries*. Elsevier, 2014.
- [29] A. Senyshyn, M.J. Mühlbauer, O. Dolotko, H. Ehrenberg *Low-temperature performance of Li-ion batteries: The behavior of lithiated graphite*. Elsevier, 2015.
- [30] B. Geller, C.Quinn, T.H. Bradley. *Analisys of Design Tradeoff for Plug-in Hybrid Vehicles*, Elsevier, 2010.
- [31] Appunti di meccanica applicata alle macchine.
- [32] L. Xiaopeng, C. Jianxun, P. Mohsen. Stop-and-go traffic analysis: Theoretical properties, environmental impacts and oscillation mitigatio. Elsevier, 2014.
- [33] P. Cocron, F. Bühler, T. Franke, I. Neumann, B. Dielmann & J. F. Krems. *Energy recapture through deceleration regenerative braking in electric vehicles from a user perspective*. Ergonomics, 2013.

- [34] 14° Rapporto sulla mobilità in Italia. Isfort, 2017.
- [35] Autorità dell'energia elettrica e gas prezzo del mercato tutelato, III trimestre, 2017.
- [36] APAT Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici. Analisi dei fattori di emissione di CO₂ dal settore dei trasporti. APAT, Rapporti 28/2003.
- [37] Regione Veneto. tecniche di rilevazione del black carbon, nel monitoraggio del rispetto della normativa sul fumo. ULSS, 19 regione Veneto 2011.
- [38] DDl 155 13 agosto 2010: http://www.camera.it/parlam/leggi/deleghe/10155dl.htm
- [39] Direttiva Europea 2008/50/CE: http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:IT:PDF.
- [40] http://www.ilsole24ore.com/art/motori/2018-02-28/diesel-auto-e-inquinamento-cosabisogna-sapere-110922.shtml?uuid=AEVypy7D.
- [41] http://www.rse-web.it/focus/Inquinamento-particolato-fine-area-padana.page.
- [42] Statistiche demografiche ISTAT, Istituto nazionale di statistica, 2017.
- [43] http://www.anci.it/index.cfm?layout=dettaglio&IdDett=56620.