

# Dottorato di Ricerca in Energetica

# Analisi e progettazione di tecnologie e architetture innovative per la mobilità sostenibile

**Coordinatore** Prof. Franco Gugliermetti

Docente guida

Prof. Fabio Orecchini

Dottorando

Lorenzo Rambaldi

XXV Ciclo

# Indice

Indic		2
Intro	duzio	ne4
1	State	o dell'arte sull'analisi delle prestazioni dei veicoli6
	1.1	Introduzione
	1.2	I cicli di marcia
	1.3	Confronto tra i principali cicli di guida9
	1.4	Valutazione dei consumi14
	1.5	Valutazione dell'autonomia in modalità di guida elettrica (ZEV)
	1.6	Le formule dei consumi per i veicoli OVC HEV 19
2	Mod	ellizzazione del consumo e delle emissioni di particolato dei veicoli22
	2.1	Obiettivi della modellizzazione del consumo e delle emissioni dei veicoli
	2.2	Strumentazione utilizzata
	2.3	Le procedure preliminari per la calibrazione di strumenti e modelli
	2.4	I modelli per il calcolo dei consumi e delle emissioni di particolato istantanee
		dei veicoli a partire dai dati di funzionamento del motore
	2.5	Modelli per il calcolo del consumo di particolato dei veicoli
3	Meto	odologia di analisi delle prestazioni energetico-emissive di veicoli53
	3.1	Obiettivi dello studio
	3.2	Definizione dell'indicatore rendimento globale
	3.3	Analisi delle prestazioni energetiche di un veicolo ibrido Plug-in
	3.4	Analisi delle prestazioni energetiche di un mini-bus ibrido alimentato ad
		idrogeno 102
	3.5	Analisi preliminare delle prestazioni di un veicolo elettrico alimentato a
		batterie 109
4	Elem tecn	enti innovativi per la progettazione di power-train e analisi delle ologie esistenti113
	4.1	Dimensionamento di un power train innovative di un veicolo alimentato ad
		idrogeno

	4.2	Sviluppo di una strategia di gestione energetica del motore a combustione		
		interna di un veicolo ibrido serie1	.18	
5	Integ	razione dei veicoli elettrici all'interno delle Smart grids1	.33	
	5.1	Impatto delle FER sulla rete elettrica1	.33	
	5.2	Impatto dei veicoli elettrici sulla rete elettrica1	.34	
	5.3	Sviluppo delle reti di distribuzione attive 1	.36	
	5.4	Utilizzo dell'auto elettrica per la fornitura di servizi per la rete1	.38	
	5.5	Conclusioni 1	.42	
Conc	lucion	.i. 1	12	
Conc	lusion	II	43	
Riferimenti bibliografici144				
Pubb	Pubblicazioni147			

# Introduzione

I veicoli di nuova generazione, sempre di più elettrificati e con tecnologie di accumulo energetico sempre più avanzate, rappresentano l'evoluzione verso una mobilità a consumi di combustibile ridotte o nulle, con chiare conseguenze in termini di emissioni locali.

Tuttavia l'adozione di metodi di valutazione concepiti per veicoli convenzionali può rivelarsi poco soddisfacente. È stato infatti dimostrato che i cicli di marcia standard sui quali vengono misurate le prestazioni dei veicolo in commercio non riproducono fedelmente le condizioni di guida reali, in particolare in ambito strettamente urbano. Questo difetto sottopone il sistema di propulsione a regimi poco variabili, permettendo al costruttore di progettarlo in modo tale che si comporti in maniera ottimale solo durante i test di omologazione.

Il lavoro di dottorato si colloca proprio all'interno della ricerca di tecnologie ed architetture innovative per la mobilità sostenibile e della loro valutazione. In un contesto dove i consumi globali sono fortemente in crescita, e quello dei trasporti rappresenta uno dei settori più energivori, sono stati presi in considerazione in particolare l'impatto energetico ed emissivo dei veicoli destinati al trasporto delle persone.

Scopo del lavoro è stato quello di valutare il reale impatto che un veicolo ha sull'ambiente e sul consumo delle risorse energetiche, tenendo conto di tutti quei fattori che, nell'uso reale ne migliorano o ne peggiorano le prestazioni.

A questo proposito, come elemento di valutazione, è stato introdotto un indice di valutazione sintetica dei veicoli definito come rendimento globale. Su un ciclo chiuso è pari al rapporto tra l'energia di natura dissipativa e l'energia che alimenta il sistema di propulsione.

Inoltre si è voluto dimostrare come veicoli dotati di powertrain innovativi, ad esempio i veicoli elettrici, possano rivoluzionare il concetto di auto. Sono stati infatti identificati delle funzioni nelle quali il veicolo non ha come solo effetto utile il trasporto dei suoi passeggeri, ma ha anche un valore aggiunto nei confronti della rete elettrica in termini di utilizzo razionale delle risorse, in particolare rinnovabili.

La finalità del percorso di dottorato, è stato quindi da un lato lo sviluppo di una metodologia capace di confrontare, dal punto di vista energetico ed emissivo, diversi veicoli tra di loro, in modo tale da poter dare anche una valutazione più vicina al reale utilizzo (e non solo di valenza comparativa) su quale sia l'impatto di un veicolo in condizioni di funzionamento reale, in termine di consumi ed emissioni; dall'altro l'analisi dell'interazione tra i veicoli elettrificati e la rete elettrica, finalizzata al suo efficientamento.

Il lavoro di tesi si suddivide quindi in cinque capitoli.

Nel primo capitolo vengono introdotte le attuali procedure di valutazione energetica ed emissiva dei veicoli, con particolare riferimento ai cicli di marcia utilizzati per il mercato europeo, americano ed asiatico.

Nel secondo capitolo viene descritta l'attività compiuta nell'ambito della modellizzazione dei consumi e delle emissioni dei veicoli partendo da semplici parametri motoristici, con la finalità di prevedere quale possa essere il comportamento energetico ed emissivo di un veicolo nelle condizioni operative più critiche.

Nel terzo capitolo viene introdotto l'indicatore rendimento globale e vengono descritte le esperienze reali avute nell'applicazione della metodologia di valutazione proposta su differenti veicoli dotati di powertrain innovativo (ibrido plug-in, EV, mini-bus ad idrogeno).

Nel quarto capitolo, tenendo conto dei risultati dei capitoli precedenti e con la finalità di massimizzare l'indicatore rendimento globale, vengono descritte alcune procedure di progettazione di componenti di un powertrain innovativo e della sua logica di gestione dei flussi energetici.

Nel quinto capitolo, viene definito il potenziale ruolo dell'auto non solo come mezzo adibito al trasporto di cose e persone, ma anche come componente di un sistema energetico più ampio che può fornire servizi ancillari alla rete elettrica.

# 1 Stato dell'arte sull'analisi delle prestazioni dei veicoli

# 1.1 Introduzione

L'arrivo sul mercato di nuove famiglie di veicoli sempre di più elettrificati pone un crescente numero di problematiche sulla validità dei metodi di valutazione delle loro prestazioni energetiche ed emissive. Le attuali procedure per la dichiarazione dei consumi e delle emissioni, infatti, possono generare risultati di scarso significato pratico se applicate a veicoli alimentati da combustibili ad impatto locale nullo (idrogeno o energia elettrica). Lo scopo iniziale di questo capitolo è proprio quello di stabilire quanto tali procedure di omologazione siano opportune a valutare i suddetti veicoli, con particolare interesse all'ambito energetico, più che a quello emissivo.

# 1.2 I cicli di marcia

Consumi ed emissioni dipendono fortemente dalle condizioni in cui i veicoli si trovano ad operare. Per queste ragioni, per consentire un confronto praticabile, la normativa tecnica definisce dettagliatamente le condizioni di riferimento standardizzate in base alle quali debbono essere condotte le rilevazioni di consumi ed emissioni [1].

La normativa definisce i cicli di guida applicabili al veicolo in esame e le modalità di esecuzione. Di seguito, a titolo di esempio, si riportano alcuni esempi chiave di cicli di omologazione, europei ed extraeuropei.

Le procedure di esecuzione delle prove sono notevolmente dettagliate e cercano di tenere conto delle potenziali criticità che nuove tecnologie possano portare nell'ambito della modalità di esecuzione dei test.

Inoltre la normativa definisce anche una serie di parametri, che da un'analisi superficiale potrebbero sembrare secondari, ma che in condizioni reali si dimostrano determinanti e devono quindi sottostare a definite condizioni. Alcuni di questi sono ad esempio: pressione dei pneumatici, viscosità dei lubrificanti, stato degli ausiliari, stato di carica dei sistemi di accumulo, temperatura delle batterie, ecc...

# 1.2.1 Il ciclo Europero NEDC (New European Driving Cycle)

Il ciclo europeo NEDC (Figura 1-1) è il ciclo di marcia standard di omologazione utilizzato per i veicoli commercializzati all'interno dell'Unione Europea [2]. Esso deriva dalla combinazione di due moduli elementari: il ciclo UDC (Urban Driving Cycle) che è indicativo di un ciclo urbano con una velocità di punta pari a 50 km/h e il ciclo EUDC (Extra urban driving cycle) che è indicativo di un ciclo urbano con una velocità di punta pari a 120 km/h.

La prova è complessivamente composta da 4 segmenti UDC (Urban Driving Cycle), ripetuti senza interruzione, seguiti dal segmento EUDC (Extra Urban Driving Cycle). I quattro segmenti UDC coprono una distanza di 4,052 km in un tempo pari a 780

secondi. Il segmento EUDC copre una distanza di 6,955 km in un tempo pari a 400 secondi.



Figura 1-1 – Ciclo urbano NEDC (New European Driving Cycle)

## 1.2.2 Il ciclo americano FTP-75 (Federal Test Procedure)

Il test, eseguito con avviamento a freddo, simula una guida urbana a bassa velocità con frequenti fermate [2]. Nasce dal precedente ciclo FTP-72, aggiungendo in coda al test una terza fase identica alla prima fase del ciclo FTP-72 ma con avviamento a caldo. Quest'ultima fase si esegue dopo aver lasciato il motore spento per 10 minuti. La distanza totale è di 17,77 km per una durata della prova pari a 1874 secondi (Figura 1-2).

# 1.2.3 Il ciclo americano HWFET (Highway Fuel Economy Cycle)

Il test simula una guida su strada a scorrimento veloce, tipica della realtà Amerciana, con una velocità media di 77,7 km/h [2] (Figura 1-3).



Figura 1-2 – Ciclo urbano FTP-75



Figura 1-3 – Ciclo Extraurbano HWFET

## 1.2.4 Il ciclo americano SFTP (Supplemental Federal Test Procedure) US06

Costituisce una delle prove supplementari al ciclo FTP-75 e rappresenta uno stile di guida più aggressivo (Figura 1-4), con accelerazioni più marcate e velocità sostenuta (velocità media: 77,9 km/h, velocità massima: 129,2 km/h) [2].

## 1.2.5 Il ciclo giapponese 10.15

Questo ciclo è attualmente utilizzato in Giappone per certificare emissioni e consumi di veicoli leggeri. Si compone di due moduli elementari:

10-mode : guida urbana, fino a 40 km/h

15-mode : guida su strada a scorrimento veloce, fino a 70 km/h.

La prova si svolge eseguendo 3 volte il segmento 10-mode e una volta il segmento 15mode. Il ciclo comprende una prima parte di warm-up in cui non si raccolgono dati, che termina con l'esecuzione del segmento 15- mode. Si percorre una distanza di 4,16 km, per una durata di 660 secondi (Figura 1-5) [2].



Figura 1-4 - Ciclo supplementare SFTP - US06



Figura 1-5 – Ciclo urbano 10.15

# 1.3 Confronto tra i principali cicli di guida

Tra i cicli di marcia attualmente in vigore esposti precedentemente, sono stati presi in considerazione quelli che presentano qualitativamente condizioni di guida assimilabili ad un percorso urbano con una parte di strada a scorrimento veloce.

In Tabella 1-1, Tabella 1-2, Tabella 1-3 vengono confrontati dei parametri cinematici dei cicli di marcia standard con parametri che fanno riferimento a due generici cicli di marcia reali acquisiti durante una campagna di acquisizione Uno di questi cicli (Reale sport) è generato da uno stile di guida notevolmente più sportivo e aggressivo rispetto al secondo (Reale eco). Per il calcolo dei parametri dinamici, ci si riferisce a titolo di esempio ad un veicolo dalle seguenti caratteristiche: Massa = 1200 kg, Area Frontale =  $2 \text{ m}^2$ , C<sub>x</sub> (coefficiente di penetrazione aerodinamica) = 0.3 [3]

Come si può notare dai parametri proposti, i cicli di guida standard presentano caratteristiche tali da non descrivere adeguatamente le condizioni di traffico reale. I cicli standard operano a velocità medie superiori, con uno scarto dai dati superiore; ma se si osservano i parametri dinamici, si notano valori minori sul massimo e la deviazione standard.

L'indice spk (numero di arresti per km) mostra che nei cicli di omologazione il veicolo si ferma completamente un quinto delle volte rispetto ai cicli reali scelti. Le inversioni di potenza (ipk) sono circa un ordine di grandezza più frequenti, mentre i tratti costanti complessivi (cpk) sono un ordine di grandezza in meno. Questi valori, chiaramente differenti da quelli standard, costituiscono una misura di quanto il sistema di propulsione in condizioni reali si trovi raramente in condizioni di stazionarietà.

Un metodo per mettere a confronto visivamente i cicli di guida è quello di rappresentarli come diagrammi velocità-potenza. Un sistema di propulsione è tanto più efficiente quanto più si trova ad operare in condizioni stazionarie, che sul diagramma significa avere dei punti concentrati in un'area ristretta. I grafici in Figura 1-8, Figura 1-9, Figura 1-10 mostrano chiaramente che il ciclo di omologazione giapponese fa lavorare il veicolo a potenze limitate ed a regimi poco variabili. Nel ciclo europeo si raggiungono potenze elevate, ma solo per un ristretto campo di punti di funzionamento. Del resto, prendendo in considerazione solo la parte urbana, fino a 50 km/h, si toccano appena i 10 kW. Nel caso del ciclo americano FTP-75 si ha una discreta dispersione di punti, ma è facile riconoscere due zone ad alta densità.

Questo significa che il sistema di propulsione lavora a basso rendimento solo per brevi istanti. In zona urbana, anche in questo caso, si riconosce un'area ristretta in cui la potenza non supera quasi mai i 10 kW. Il grafico in Figura 1-11 mostra infine i punti di funzionamento dei due cicli reali introdotti sopra. Come si può notare, si ha una dispersione di punti molto più marcata; si raggiungono potenze elevate con una frequenza maggiore e con valori più importanti. Inoltre la zona ad alta densità è chiaramente più ampia, con potenze fino a 15 kW, con evidenti implicazioni in termini di consumi ed emissioni.

Non sono da sottovalutare nemmeno i valori di potenza sul semiasse negativo. Com'è noto i veicoli innovativi consentono il recupero di energia in decelerazione, che presentano dei limiti dovuti a correnti troppo elevate. Questo significa che in presenza di forti decelerazioni il sistema idraulico interverrà in maniera prevalente rispetto al sistema a recupero, con conseguente diminuzione del rendimento globale. Come si deduce dalle figure seguenti, nei cicli standard si raggiungono potenze intorno a -15 kW per pochi istanti, con la gran parte dei valori entro i -10 kW. Invece nei cicli reali si

superano spesso i -10 kW, con qualche picco anche oltre -20 kW. Questi valori di potenza costituiscono un altro indicatore della variabilità delle condizioni di traffico urbano, in cui avvengono frequentemente brusche frenate e i rallentamenti non sempre sono dolci e graduali.



Figura 1-6 – Dipendenza dell'indice spk da V

CICLO	$\bar{v}  [km/h]$	$\nu_{max}\left[km/h\right]$	$\sigma_{\nu}[km/h]$
NEDC	33,2	120	31,1
10–15	25,6	70	23,8
FTP-75	33,8	90,7	25,5
Reale eco	17,7	67,9	15,5
Reale sport	24,7	91,5	19,8

Tabella 1-1 – Confronto tra cicli di guida: parametri cinematici

Tabella 1-2 – Confronto tra cicli di guida: parametri dinamici

CICLO	₽ [Kw]	$P_{max}[Kw]$	$\sigma_{P} \left[ K \boldsymbol{\mathcal{W}} \right]$
NEDC	3,06	31,5	6,07
10–15	1,83	10,8	3,65
FTP-75	2,74	23,7	5,71
Reale eco	1,16	34,7	4,85
Reale sport	1,75	42,0	7,62

Tabella 1-3 – Confronto tra cicli di guida: parametri di visibilità

CICLO	spk [km <sup>-1</sup> ]	ipk [km <sup>-1</sup> ]	cpk
NEDC	1,2	3,4	57%
10-15	1,3	5,0	35%
FTP-75	1,2	11,9	12%
Reale eco	6,2	78,3	3%
<b>Reale sport</b>	5,5	39,2	3%



Figura 1-7 - Dipendenza dell'indice cpk da dev.st(v)







Figura 1-9 – Diagramma velocità-potenza. Ciclo 10-15



Figura 1-10 – Diagramma velocità-potenza. Ciclo FTP-75



Figura 1-11 – Diagramma velocità-potenza. Ciclo reale

#### 1.4 Valutazione dei consumi

Nella valutazione dei consumi, per qualsiasi tipo di veicolo, l'idea base è quella di tener conto della presenza di sistemi di accumulo e della loro influenza benefica sui consumi di combustibile. Sui veicoli ibridi non ricaricabili dall'esterno (NOVC – Not Off Vehicle Charging Hybrid Electric Vehicles) si stima la variazione del contenuto energetico delle batterie, al fine di applicare un coefficiente correttivo al consumo di combustibile. Sui

veicoli ricaricabili dall'esterno (OVC – Off Vehicle Charging Hybrid Electric Vehicle detti più frequentemente PHEV – pulg in hybrid electric vehicle), invece, si eseguono due prove, una ad accumulatori carichi, l'altra ad accumulatori scarichi. Il risultato è un consumo medio ponderato tra due prove. [3]

In generale, si esegue una combinazione delle seguenti procedure di cui vengono riportate le definizioni:

**Ricarica:** Si esegue collegando al veicolo il sistema di alimentazione di cui è eventualmente dotato e si lascia inserito fino a carica completa. Se è necessario conoscere l'energia prelevata da rete si inserisce un contatore di energia tra il punto di consegna e l'alimentatore. La ricarica deve avvenire in un ambiente a temperatura compresa tra 20 e 30 °C.

**Scarica:** Si esegue lasciando il veicolo su un banco a rulli a velocità costante, pari in genere al 70% della velocità massima, in modalità elettrica fino alla condizione di scarica che, ad esempio, per i veicoli ibridi plug-in è segnalata dall'accensione del motore termico.

**Condizionamento:** Si esegue almeno un ciclo di marcia completo senza acquisizione di dati. Lo scopo è quello di raggiungere uno stato ben definito. Nel caso di ibridi OVC, al termine di questa fase (eseguita sempre dopo almeno una delle precedenti) il veicolo si trova in una delle due condizioni:

- Condizione A: Accumulatori al SOC massimo;
- Condizione B: Accumulatori al SOC minimo.

**Sosta** Mantenimento del veicolo in un locale a temperatura compresa tra 20 e 30 °C, per almeno 6 ore.

**Esecuzione** della prova Si esegue il ciclo applicabile con acquisizione dei dati necessari. Nel caso di ibridi NOVC si può prescrivere la misura del bilancio amperometrico del sistema di accumulo. È dunque necessario inserire uno strumento di misura della corrente (pinza amperometrica) e il costruttore deve rendere accessibili i punti di inserzione.

Al termine della prova saranno noti uno o più dei seguenti valori:

- Consumo di combustibile [l]
- Distanza percorsa [km]
- Energia di ricarica [Wh]
- Bilancio amperometrico degli accumulatori [Ah]

In seguito saranno descritti i metodi di calcolo, caso per caso. La procedura si adatta a ciascuna famiglia di veicoli ibridi. Per ognuna di esse si elencano i passi fondamentali.

## 1.4.1 Veicoli ibridi non ricaricabili dall'esterno (NOVC)

Modalità di esecuzione:

- 1. Condizionamento;
- 2. Esecuzione della prova.

Calcolo dei consumi:

La prova fornisce:

- Distanza percorsa D [km];
- Consumo di carburante c [l];
- Consumo specifico di carburante C = c/D [l/100 km];
- Bilancio amperometrico del sistema di accumulo Q [Ah].

La variazione del contenuto energetico del sistema di accumulo si calcola nel modo seguente:

$$\Delta E_{batt} = \Delta SOC\% \cdot E_T = 0,0036 \cdot Q \cdot V_{batt} [MJ]$$

dove  $E_T$  [kWh] è la capacità totale di accumulo, e V<sub>batt</sub> [V] è la tensione nominale.

Il consumo di carburante si calcola applicando una correzione a C attraverso  $\Delta E_{batt}$  nel modo seguente:

$$C_0 = C - K_{carb} \cdot E_{batt} [I/100km]$$

Dove  $K_{carb}$  è un coefficiente calcolato e dichiarato dal costruttore. Il consumo dichiarato sarà dunque  $C_0$ .

# 1.4.2 Veicoli ibridi ricaricabili (OVC) non dotati di commutatore della modalità di guida

#### Condizione A. Modalità di esecuzione:

- 1. Scarica
- 2. Condizionamento
- 3. Ricarica
- 4. Esecuzione della prova
- 5. Ricarica

L'andamento del SOC è rappresentato in Figura 1-12.

## Condizione B. Modalitàa di esecuzione:

1. Condizionamento (fac.)

- 2. Scarica
- 3. Sosta
- 4. Esecuzione della prova
- 5. Ricarica
- 6. Scarica
- 7. Ricarica

L'andamento del SOC è rappresentato in Figura 1-13.

#### Calcolo dei consumi:

La prova nella condizione A fornisce:

- Distanza percorsa D<sub>1</sub> [km]
- Consumo di carburante c<sub>1</sub> [l]
- Consumo specifico di carburante C<sub>1</sub> = c<sub>1</sub>/D<sub>1</sub> [l/100km]
- Consumo di energia elettrica dalla seconda ricarica e<sub>1</sub> [Wh]
- Consumo specifico di energia elettrica  $E1 = e_1/D_1$  [Wh/km].

La prova nella condizione B fornisce:

- Distanza percorsa D<sub>2</sub> [km]
- Consumo di carburante c<sub>2</sub> [l]
- Consumo specifico di carburante C<sub>2</sub> = c<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> [l/100km]
- Consumo di energia elettrica dalla prima e dalla seconda ricarica, rispettivamente e<sub>2</sub>, e<sub>3</sub> [Wh]
- Consumo netto di energia elettrica: e<sub>4</sub> = e<sub>2</sub> e<sub>3</sub> [Wh]
- Consumo specifico di energia elettrica E<sub>2</sub> = e<sub>4</sub>=D<sub>2</sub> [Wh/km]

Il consumo ponderato di carburante si calcola secondo la seguente formula:



Figura 1-12 – Andamento del SOC nella condizione A



Figura 1-13 – Andamento del SOC nella condizione B

Dove  $D_e$  è l'autonomia in elettrico e  $D_{AV}$  è la distanza media tra due ricariche, assunta pari a 25 km.

Il consumo ponderato di energia elettrica si calcola con la seguente formula:

$$E = \frac{E_1 D_e + E_2 D_{AV}}{D_e + D_{AV}}$$

# 1.4.3 Veicoli ibridi ricaricabili (OVC) dotati di commutatore della modalità di guida

La procedura è identica al caso precedente, ma per ciascuna condizione si sceglie la posizione del commutatore in base alle regole descritte in Tabella 1-4.

Modalità disponibili		· Puro Elettrico	· Termico	· Elettrico	· ibrido n
		· Ibrido	· Ibrido	• Ibrido • Termico	: · ibrido m
posizione	Cond. A	Ibrido	Ibrido	Ibrido	preval. elettrico
posizione	Cond. B	Ibrido	Termico	Termico	preval. termico

Tabella 1-4 – Regole per la sce	lta della posizione del commutatore
---------------------------------	-------------------------------------

#### 1.4.4 Veicoli elettrici

#### Modalità di esecuzione:

- 1. Scarica
- 2. Ricarica
- 3. Esecuzione della prova
- 4. Ricarica

La prova consiste nell'esecuzione di due cicli completi.

#### Calcolo dei consumi:

La seconda fase di ricarica fornisce il valore dell'energia elettrica spesa dall'utente E [Wh]. Durante la prova viene registrata la distanza percorsa D<sub>e</sub> [km]. Il consumo specifico di energia è dato dalla seguente formula:

$$C_e = E_r/D_e$$

## 1.5 Valutazione dell'autonomia in modalità di guida elettrica (ZEV)

La seguente procedura si applica ai veicoli con solo motopropulsore elettrico (EV) e ai veicoli ibridi ricaricabili (OVC HEV).

#### Modalità di esecuzione:

- 1. Scarica
- 2. Ricarica
- 3. Esecuzione della prova

La prova consiste nella ripetizione del ciclo applicabile, fino al raggiungimento del criterio di fine prova, cioè "quando il veicolo non è in grado di rispettare la curva obiettivo fino a 50 km/h, o quando la strumentazione standard di bordo segnala al conducente la necessità di arrestare il veicolo, o quando il motore termico si mette in moto (solo per i veicoli ibridi). A questo punto il veicolo deve essere rallentato fino a 5 km/h rilasciando il pedale dell'acceleratore senza toccare il pedale del freni, e successivamente fermato con il freno".

**Calcolo del'autonomia:** Durante la prova viene registrata la distanza percorsa  $D_e$  [km] che corrisponde all'autonomia in solo elettrico.

# 1.6 Le formule dei consumi per i veicoli OVC HEV

Nel dichiarare il consumo di un veicolo OVC la normativa utilizza la seguente formula.

$$C = \frac{C_1 D_e + C_2 D_{AV}}{D_e + D_{AV}}$$

dove:

D<sub>e</sub> = autonomia in elettrico;

D<sub>AV</sub> = distanza media tra due ricariche, assunta pari a 25 km.

La filosofia che sta alla base di questa metodologia di valutazione è quella di calcolare una media pesata tra il consumo a carica massima, e quello a carica minima; i pesi sono rispettivamente l'autonomia in elettrico e la distanza media tra due ricariche.

Per verificare la validità di questa formula si assuma ad esempio un veicolo che abbia un'autonomia di 30 km con un consumo nella condizione A pari a zero e nella condizione B pari a 5 l/100 km. La formula fornisce il seguente consumo:

$$C = \frac{5 \cdot 25}{30 + 25} = 2.27 \ l/100 km$$

Nella realtà questo non è esattamente vero, infatti se il veicolo è in grado di percorrere lo spazio tra due ricariche in solo elettrico, il consumo reale in questo caso sarebbe pari a zero. È evidente che assumere a priori la distanza tra due ricariche e pesare i consumi in questo modo comporta un discreto errore.

Un metodo più rigoroso per calcolare i consumi è dato dalla seguente funzione:

$$C(d) = \begin{cases} C_1, & \text{se } d \le D_e \\ \frac{C_1 + D_e + C_2(d - D_e)}{d}, & \text{se } d > D_e \end{cases}$$

dove la variabile d è la distanza percorsa tra due ricariche. In questo modo non si pesa più il consumo nella condizione B con la distanza tra due ricariche ma con la distanza effettiva percorsa in quella condizione. A questo punto ci si chiede se sia corretto decidere a priori la distanza percorsa nella condizione B, cioè in puro ibrido. Allora è evidente che produrre questa ipotesi per arrivare a dichiarare i consumi con un unico valore è poco verosimile. Per rendere visibile questo difetto normativo, si possono confrontare graficamente le due formule, ponendo  $D_{AV} = d$ , dato che i due termini hanno concettualmente lo stesso significato.

Dai grafici in Figura 1-14 e Figura 1-15 e si osserva che:

- Maggiore è la distanza ipotizzata tra due ricariche, minore è la differenza tra consumo reale e stimato
- Minore è la differenza tra D<sub>e</sub> e D<sub>AV</sub>, maggiore è la sovrastima del consumo.

La seconda osservazione comporta che, se  $D_e = D_{AV}$  si ha un massimo della sovrastima, con un consumo pari in questo esempio a 2,5 l/100 km invece che 0 l/100 km.

Il principale difetto della formula normativa sta nel fatto di equiparare un veicolo dalla doppia natura, ad un veicolo convenzionale. Questa ipotesi produce due problemi opposti:

- 1. Si sovrastimano i consumi in puro elettrico;
- 2. Si sottostimano i consumi in puro ibrido.

Se da un lato si ha a disposizione un indice che permette il confronto con altri veicoli, tale confronto ha poco senso, basandosi quell'indice su ipotesi troppo semplificative.



Figura 1-14 – Confronto tra il consumo reale e consumo normativo, in funzione della distanza ipotizzata tra due ricariche



Figura 1-15 – Sovrastima del consumo

# 2 Modellizzazione del consumo e delle emissioni di particolato dei veicoli

# 2.1 Obiettivi della modellizzazione del consumo e delle emissioni dei veicoli

L'inquinamento prodotto dal settore dei trasporti su strada è un problema sempre più attuale, risultando tale settore uno dei principali responsabili della produzione di sostanze dannose per l'uomo e per l'ambiente. La questione appare particolarmente articolata e di difficile soluzione, risultando peraltro non semplice anche la quantificazione delle emissioni rilasciate dai veicoli nella loro circolazione su strada.

La necessità di pervenire a tale quantificazione ha condotto allo sviluppo di diversi metodi di misura ma la questione non è ancora risolta, mostrando i metodi attualmente esistenti alcuni limiti. [4-12]

I dati dichiarati successivamente all'omologazione di qualsiasi veicolo sono stabiliti da test standard uguali per tutti allo scopo di rendere omogenei e confrontabili i risultati [4]. Le condizioni in cui vengono svolti questi test non sono vicine a quelle di reale funzionamento dei veicolo, ne consegue che i risultati dei test sono ben diversi da quelli effettivi che un veicolo avrebbe in condizioni reali.

Per caratterizzare compiutamente consumi ed emissioni di un veicolo si definisce così la necessità di effettuare misure delle emissioni nel reale contesto di impiego dello stesso, cioè su strada, che può essere svolta mediante analizzatori portatili dei gas di scarico [6]. Queste apparecchiature sono tuttavia costose, ingombranti e richiedenti frequenti calibrazioni da parte di personale esperto, non risultando così adatte a vaste campagne di acquisizione.

Del resto i sistemi di monitoraggio nell'aria della concentrazione di inquinanti dovuti al trasporto, sono al momento in grado solo di seguire gli eventi man mano si vengono a presentare. In sostanza, con questi strumenti si è in grado solo di registrare la realtà che è già avvenuta o sta avvenendo, senza possibilità alcuna di mettere in atto strategie preventive per affrontare in maniera attiva e non passiva gli eventi dell'immediato futuro. C'è quindi una necessità evidente di mantenere sotto controllo la realtà, di comprendere le cause da cui derivano eventuali criticità, di prevederne l'evoluzione e, soprattutto, di disporre di strumenti capaci di simulare e quantificare il beneficio di azioni o piani di intervento volti al miglioramento ambientale.

Sarebbe quindi utile poter prevedere in maniera scientifica l'effettiva concentrazione di inquinanti nell'aria, in modo tale da pianificare la migliore strategia di trasporto con l'obiettivo finale di migliorare la qualità dell'aria. La previsione delle emissioni di inquinanti da applicazioni stazionarie (impianti di riscaldamento, impianti industriali ecc..) è molto più semplice perché nel contesto in cui esse vengono applicate le condizioni operative sono poco variabili.

Obiettivo di questo capitolo è quindi lo sviluppo di modelli di calcolo che, attraverso alcuni parametri operativi del motore, possano fornire, in seguito ad una calibrazione iniziale, una stima sia a priori che posteriori del consumo e del particolato carbonioso, che è uno degli inquinanti più gravosi per l'uomo e l'ambiente.

# 2.2 Strumentazione utilizzata

Le campagne di raccolta dati, così come le metodologie di analisi, vengono effettuate tramite una consolidata strumentazione ICT sviluppata dal CTL – Centro di eccellenza per il trasporto e la logistica di Sapienza Università di Roma, frutto di uno sviluppo proprio e dedicato, per il monitoraggio e la gestione delle flotte ben rappresentata in Figura 2-1 e Figura 2-2.

La strumentazione di bordo è composta da un Car-PC dotato, di un'interfaccia CAN o OBD (on-board diagnostic) a seconda del protocollo di comunicazione proprio del veicolo) e di un GPS e per la comunicazione di una scheda Wi-Fi e di un modem UMTS. Il veicolo equipaggiato (schematizzato in Figura 2-1) registra i propri dati di funzionamento in tempo reale sulla memoria del Car-PC. Periodicamente, tramite connessione UMTS, il car PC si connette al server del CTL tramite web-services, invia una "istantanea" del funzionamento del veicolo "snap-shot" e verifica la presenza di specifiche istruzioni da seguire. Ad ogni spegnimento del veicolo tutti i dati acquisiti vengono trasferiti al server del CTL sempre tramite web service. Ove mai nella zona di arresto sia presente una copertura Wi-Fi lo scarico avviene Wi-Fi, altrimenti UMTS (come mostrato dalla Figura 2-2).

L'unità installata a bordo comunica con tutte le varie centraline di gestione del veicolo ed immagazzina dati rilevanti sugli input ricevuti dal guidatore (es. marcia innestata, posizione pedali e angolo di sterzo) e sulla risposta data dal veicolo (es. tutti i parametri motoristici, velocità, stato di salute del mezzo, ...). Tutti questi dati, campionati fino a 10 volte al secondo ed immagazzinati due volte al secondo, consentono di derivare informazioni quali le emissioni istantanee prodotte dal motore e il raggio di curvatura del veicolo e l'accelerazione laterale a cui questo è sottoposto con le stesse frequenze di campionamento del dato originale.

Quando il veicolo viene spento l'acquisizione si interrompe ma il Car-PC resta acceso ancora per 30 minuti per elaborare e trasmettere i dati acquisiti nella giornata tramite Wi-FI (se disponibili) o UMTS. Tramite un web service i dati arrivano ai server del CTL dove vengono georeferenziati, elaborati ed immagazzinati in un DB come mostrato dalla Figura 2-2. Il DB rende i dati disponibili, solo agli utenti autorizzati, in formato CSV per essere utilizzati con Excel o direttamente tramite browser web.

Il gestore dei processi (lato terra) è il database stesso. L'utente esterno comunica direttamente (tramite un'interfaccia Web) con il database interrogandolo.

Ogni volta che il database riceve nuovi dati da un veicolo li invia al post-processor, e li archivia nelle tabelle del Database dei dati processati per essere interrogati tramite Web dall'utente.



Figura 2-1 – Schema del terminale veicolare all'interno di un'autovettura.



Figura 2-2 – Schema logico del sistema di monitoraggio di flotte CTL.

Il sistema aggiorna automaticamente anche il software di bordo; i nuovi file di configurazione che progressivamente vengono realizzati per aggiornare il software di bordo vengono messi a disposizione delle unità di bordo che periodicamente verificano se esistano versioni aggiornate del software ed eventualmente le scaricano e le autoinstallano.

Analogamente a quanto fatto per le emissioni, che calcolate in fase di post processing trovano posto nel DB, i parametri cinematici e di guida che possono essere impiegati per caratterizzare lo stile di guida potranno essere implementati come campi aggiuntivi del DB ed essere direttamente estratti da query o visualizzati dalle interfacce web.

Le strumentazioni consentono di acquisire tutti i parametri della dinamica del veicolo (velocità, accelerazione, accelerazione laterale, raggio di curvatura, ecc...) del funzionamento del motore (velocità angolare, carico, portata d'aria aspirata, portata di combustibile, temperature dei fluidi e del catalizzatore, ecc ...) e del comportamento del conducente (posizione dei pedali, dello sterzo e marcia innestata). Tutti i dati acquisiti sono associati con la posizione istantanea del veicolo e campionati due volte al secondo. Queste grandezze, opportunamente aggregate, possono generare degli indici di comportamento e, opportunamente elaborate, misurare le prestazioni con cui il veicolo risponde al comportamento del conducente. Con tutte le informazioni raccolte è possibile calcolare un indice di comportamento del conducente che sia scevro dalle influenze della strada percorsa, del veicolo condotto e del traffico incontrato.

## 2.2.1 Horiba OBS 1300

L'Horiba OBS 1300 è un sistema di misura on board delle emissioni dei veicoli stradali caratterizzato da una serie di componenti che possono essere visualizzati in Figura 2.3 [13].



Figura 2-3 – Sistema di misura delle emissioni Horiba OBS 1300

In particolare, il sistema prevede i componenti riportati di seguito:

- MEXA-1170HNDIR, analizzatore ad infrarossi non dispersivi per la rilevazione della concentrazione volumica nei gas scarico di CO, CO2 e HC. Questo analizzatore impiega un sensore di tipo "sampling" e pertanto prevede l'utilizzo di una linea riscaldata (caratterizzata da una temperatura interna mantenuta costante a 120°C) che, senza passare per un'unità di deumidificazione, riconduce il campione dei gas da analizzare al sensore di misura. La rilevazione delle emissioni gassose viene dunque effettuata in umido e, pertanto, l'unità integra anche un sensore del vapore acqueo la cui misura viene impiegata per compensare l'interferenza della presenza di acqua nei gas di scarico;
- MEXA-720NOx, analizzatore con sensore allo zirconio di tipo "non-sampling" per la misura della concentrazione degli ossidi di azoto nei gas di scarico e la rilevazione del rapporto aria/combustibile;
- tail pipe attachment, unità che collega i sensori dei due analizzatori descritti e che va montata sul terminale di scarico del veicolo in prova. Questo componente integra anche un flussometro del tipo "tubo di Pitot" per la misura della portata dei gas di scarico, necessaria al calcolo delle emissioni in massa;
- data logger PC, computer portatile per l'acquisizione e l'immagazzinamento dei dati misurati. Deve disporre di una scheda di acquisizione PCMCIA e necessita l'installazione del software "OBS1000 data logging", compreso nel pacchetto OBS-1300;
- Data Integration Unit (DIU) che costituisce l'interfaccia di collegamento dei vari sensori ed ospita i sensori opzionali della pressione atmosferica, della temperatura ambiente, dell'umidità e della temperatura e pressione dei gas di scarico. Tale unità svolge anche la funzione di amplificatore dei segnali provenienti dal MEXA-720NOx e prevede un dispositivo GPS per la rilevazione della posizione;
- Power Supply Unit (PSU), un inverter che trasforma la corrente continua a 24 V proveniente dalle batterie di alimentazione del sistema in corrente alternata a 220 V. In alternativa può operare anche come carica batterie, trasformando la corrente alternata di rete in corrente continua;
- battery monitor, per il controllo dello stato di carica delle batterie;
- remote controller, unità per il controllo dal posto di guida del solo MEXA-1170HNDIR, che consente di passare nei diversi stati operativi del dispositivo (ad esempio dalla fase di "standby" a quella di misura vera e propria, "meas");
- componenti opzionali quali l'Engine tachometer (misura del regime di rotazione del motore), il Checker (per il controllo delle perdite e del tempo di ritardo tra la produzione dell'inquinante nel motore e il rilascio dallo scarico per il solo MEXA-1170NDIR).

L'impiego del sistema di misura delle emissioni Horiba OBS 1300 richiede lo svolgimento di periodiche operazioni di calibrazione (mediante opportuni gas), la cui effettuazione richiede:

- bombola di gas N2 (purezza minima del 99.99%) per le operazioni di "Purge" del MEXA-1170HNDIR e per quelle di "Zero" sia del MEXA-1170HNDIR che del MEXA-720NOx;
- bombola di miscela di composizione nota di N2, CO, CO2, C3H8/N2 per effettuare le operazioni di "Span" del MEXA-1170HNDIR;
- bombola di miscela di gas di composizione nota di NO e NO2 per l'esecuzione della funzione di "span" del MEXA-720NOx.

L'esigenza di eseguire frequenti operazioni di calibrazione della strumentazione rappresenta uno dei limiti che caratterizza la misurazione delle emissioni prodotte da un veicolo nel suo funzionamento su strada mediante analizzatori di gas di scarico montati on board.

Per chiarire le modalità di messa in opera dell'insieme di componenti descritti in precedenza, si riporta in Figura 2.4 uno schema delle connessioni necessarie al funzionamento del dispositivo, distinguendo tra collegamenti elettrici di segnale, di potenza e pneumatici.



Figura 2-4 – Componentistica e connessioni dell'Horiba OBS 1300

La figura evidenzia che il numero di connessioni necessarie all'allestimento del dispositivo è elevato, circostanza che fornisce una prima indicazione della complessità di approntamento della strumentazione descritta.

Inquinante	Metodo di misurazione	Range di misura	Risoluzione
СО	HNDIR	0-12%v	+/- 3% full scale
HC	HNDIR	0-5000 ppmvC6	+/- 3% full scale
02	Zirconia-ceramic sensor	0-25%v	+/- 0.5% oxygen
			+/- 30 ppmv(0-1000)
NO <sub>X</sub>	Zirconia-ceramic sensor	0-3000 ppmv	+/- 3% of reading(1001-2000 ppmv)
			+/- 5% of reading(2001-3000 ppmv)
CO2	NDIR	0-25 %v	+/- 3% full scale

Tabella 2-1 – Datasheet dell'Horiba OBS-1300

## 2.2.2 AVL 483 Micro Soot Sensor

L'AVL 483 Micro Soot Sensor è un sistema finalizzato alla misurazione dinamica della concentrazione di soot presente nei gas di scarico dei motori a combustione interna [14].

E' composto da tre unità di base (Figura 2-5):

- AVL 483 Micro Soot Sensor
- AVL Exhaust Conditioning Unit
- Pressure Reducing Module



Figura 2-5 – AVL 483 Micro Soot Sensor, AVL Exhaust Conditioning Unit



Figura 2-6 - Principio di funzionamento dell' AVL 483 Micro Soot Sensor

La geometria della camera di risonanza limita i depositi di soot al suo interno. L'aria pulita non produce alcun segnale. Il segnale del sensore è direttamente proporzionale alla sola concentrazione del soot ed è insensibile alla presenza degli altri inquinanti adsorbiti e dell'acqua presente nei gas di scarico. Inoltre il valore della concentrazione è indipendente dalle dimensioni del soot stesso. Al momento, la tecnologia di misurazione foto acustica usata dall'AVL 483 Micro Soot Sensor è considerata nei laboratori di misurazione nell'ambito automotive come il miglior metodo di misurazione di minime quantità di soot nelle emissioni a costi accettabili.

Essa è in grado di rilevare concentrazioni minime nell'ordine dei 5  $\mu$ g/m<sup>3</sup>, con una risoluzione di 1 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, inoltre è caratterizzata da un ampio campo di misura, 0 – 50 mg/m<sup>3</sup>.

Non necessita di alcun componente aggiuntivo per la calibrazione.

Nella Figura 2-7 sono mostrati i principali componenti interni dell'unità AVL 483 Micro Soot Sensor.

La presenza delle unità AVL Exhaust Conditioning Unit e Pressure Reducing Module permette inoltre di effettuare misurazioni on-board e in assenza di filtro antiparticolato.



Figura 2-7 – Interno dell'AVL 483 Micro Soot Sensor. 1 - Diodo laser. 2 - Cavo in fibra ottica. 3 - Collimatore. 4 - Camera di risonanza. 5 - Laser splitter. 6 - Fotodiodo di controllo. 7 - Schermo.

L'AVL Exhaust Conditioning Unit permette infatti la diluizione dei gas di scarico con due diversi range per il rapporto di diluizione  $r_{dil.}$ : da 2 a 10, con accuratezza +/- 3%, e da 10 a 20 con accuratezza +/- 10%.

Il gas di scarico viene diluito con aria altamente filtrata; la massa del flusso totale (somma del gas campionato e dell'aria di diluizione) è determinato da un Mass Flow Meter (MFM) che provvede a mantenere anche una temperatura costante. Il rapporto di diluizione è il rapporto fra il flusso totale  $Q_{tot}$  e la differenza fra il flusso totale  $Q_{tot}$  e la quantità di aria di diluizione  $Q_{dil}$ .

$$r_{dil.} = \frac{Q_{tot}}{Q_{tot} - Q_{dil}}$$

L'aria di diluizione è controllata con frequenza maggiore di 5 Hz in modo da mantenere costante il rapporto di diluizione; il software fornisce infine la concentrazione del soot, corretto con la diluizione e il rapporto di diluizione corrente.

L'unità Pressure Reducing Module permette la riduzione della pressione. Si possono misurare gas di scarico con contropressioni al punto di prelievo fino a 2 bar (rel.) e temperature fino a 1000 °C per massimo 60 secondi e 800 °C in continuo.

In Figura 2-8 è riportata una descrizione dei principali componenti dell'unità di riduzione della pressione, mentre nella Figura 2-9 si possono vedere tutte le unità assemblate e pronte all'uso.



Figura 2-8 – Descrizione del modulo di riduzione della pressione: A. Sonda di collegamento. B. Fori filettati per il fissaggio del modulo di riduzione della pressione. C. Vaso di espansione con nipplo di collegamento. D. Ingresso aria di diluizione. E. Linea di uscita per il gas di scarico diluito. F. Camera di diluizione. G. Modulo di riduzione della pressione



Figura 2-9 – Le tre unità base collegate e pronte all'uso

Moocuring rongo	0 – 10 mg/m³
	0 – 50 mg/m³
	0,001 mg/m³
Display resolution	0,01 mg/m <sup>3</sup> (depends on range)
Detection limit	≤10 μg/m³, typically ~ 5 μg/m³
Dete sete	Digital: 10Hz
Data rate	Analog: 100 Hz

#### Tabella 2-2 - Datasheet dell'AVL Micro soot sensor

#### 2.2.3 Trattamento dati

Tutti i dati acquisiti dalle strumentazioni appena descritte vengono salvati su pc per essere poi analizzati.

Le tre strumentazioni utilizzate sono caratterizzate ognuna da una frequenza di acquisizione diversa; affinchè i dati siano facilmente confrontabili è stato quindi necessario effettuare un trattamento dei dati che rendesse omogenea la frequenza di acquisizione.

Ciò è stato realizzato tramite un programma che esegue un interpolazione lineare e che restituisce tutti i dati con una frequenza di acquisizione di 0,1 secondi.

Inoltre essendo le tre strumentazioni completamente indipendenti si è dovuto procedere ad un riallineamento temporale dei dati, traslando in avanti i dati delle strumentazioni in ritardo (quelle di rilevazione delle emissioni).

Questa operazione è molto complessa, essendo il ritardo tra le strumentazioni influenzato sia da parametri fissi come la lunghezza del condotto di scarico o dei tubi che convogliano i gas di scarico dal punto di prelievo a quello di misurazione, sia da parametri variabili come il regime di rotazione del motore. Risulterà quindi quasi impossibile effettuare un preciso allineamento dei dati lungo tutta la durata di una prova, soprattutto se essa è caratterizzata da ampie oscillazioni dei parametri motoristici (regime di rotazione, carico, etc.).

## 2.3 Le procedure preliminari per la calibrazione di strumenti e modelli

Per ogni tipo di veicolo da monitorare il veicolo è stato preso per due giorni e messo fuori flotta. E' stata installata la strumentazione ed è stato portato il veicolo presso un banco a rulli per effettuare una serie di test di calibrazione della strumentazione, di verifica e controllo del funzionamento e di compatibilità della strumentazioni con altre eventuali strumentazioni di bordo (es. la strumentazione di localizzazione del carsharing). [15]

Per le prove sono stai utilizzati due diversi tipi di banco a rulli. Il banco a rulli dell'ENEA, sito nel centro ricerche della Casaccia, è stato utilizzato per le prove sui cicli trascinati e per le prove di simulazione stradale su cicli urbani. L'uso del suddetto banco a rulli è stato limitato dall'impossibilità di effettuare prove oltre una certa velocità (circa 65 km/h). Per tutte le prove che necessitavano di una velocità superiore si è quindi utilizzato il banco a rulli presso Martorelli's cars, che pur essendo meno sofisticato rispetto a quello ENEA, permette di raggiungere velocità e potenze notevoli.

Posizionato il veicolo sul banco a rulli, assicurato con cinghie e fermi, si procede all'accensione della strumentazione che necessita di un certo tempo per l'avvio.

La strumentazione utilizzata per il rilevamento degli inquinanti è la seguente:

- Horiba OBS 1300
- AVL 483 Micro Soot Sensor

Si fissano le sonde delle due strumentazioni utilizzate al terminale di scarico della vettura e si procede alla calibrazione dei sistemi di misura. Per quanto riguarda l'Horiba OBS 1300, una volta collegate le due bombole alla strumentazione, si procede con una calibrazione automatica che in sequenza effettuerà le operazioni di "Purge", "Zero" e "Span". In alternativa le operazioni possono anche essere eseguite singolarmente e in modalità manuale. L'AVL 483 Micro Soot Sensor ha una procedura di calibrazione completamente automatica, della durata di 5 minuti, che si avvia quando si vuole cominciare le operazioni di misurazione; inoltre ogni volta che la strumentazione viene messa in stand-by, prima del riavvio viene effettuata una nuova procedura di calibrazione. E' consigliabile effettuare una calibrazione almeno ogni 30-60 minuti di misurazioni.

A calibrazione avvenuta di entrambe le strumentazioni si cominciano le prove al banco.

Si fissano le sonde delle due strumentazioni utilizzate al terminale di scarico della vettura e si procede alla calibrazione dei sistemi di misura. Per quanto riguarda l'Horiba OBS 1300, una volta collegate le due bombole alla strumentazione, si procede con una calibrazione automatica che in sequenza effettuerà le operazioni di "Purge", "Zero" e "Span". In alternativa le operazioni possono anche essere eseguite singolarmente e in modalità manuale. L'AVL 483 Micro Soot Sensor ha una procedura di calibrazione completamente automatica, della durata di 5 minuti, che si avvia quando si vuole cominciare le operazioni di misurazione; inoltre ogni volta che la strumentazione viene messa in stand-by, prima del riavvio viene effettuata una nuova procedura di calibrazione. E' consigliabile effettuare una calibrazione almeno ogni 30-60 minuti di misurazioni.

Le principali prove effettuate al banco a rulli per la calibrazione dei modelli sono:

- Warm-up
- Idling
- Prova a numero di giri costante e carico variabile
- Potenza massima

Moto vario

Risulta molto importante valutare il comportamento della vettura nella fase di accensione a motore freddo e fino al raggiungimento delle normali temperature di esercizio. Alcuni parametri, infatti, come la temperatura del catalizzatore o quella del liquido refrigerante, influiscono fortemente in termini di consumi ed emissioni. [16]

La prova di warm-up ha proprio questa funzione; si avvia la vettura a freddo e si acquisiscono i dati dalle strumentazioni fino a che gli inquinanti (o il consumo) non si stabilizzano.



Figura 2-10 – Tipica prova di warm up

In Figura 2-10 si riportano i risultati di una tipica prova di warm-up.

Il picco di concentrazione della parte carboniosa del particolato (soot) corrisponde all'accensione del motore, si nota poi come con il progressivo riscaldamento del liquido di raffreddamento e quindi del motore stesso, i livelli di emissione si abbassino.

Per la costruzione dei modelli di consumo ed emissione e per la loro calibrazione è necessario conoscere il comportamento della vettura ai carichi minimi, quando cioè al motore viene richiesto il minimo della potenza. Per valutare questa condizione si effettua la prova in Idling.

La prova in Idling viene effettuata senza marcia innestata aumentando di volta in volta il numero di giri del motore. Si procede a step di 500 rpm, rimanendo fissi per qualche secondo ad ogni step, in modo che si stabilizzino i valori delle emissioni misurati. In Figura 2-11 si riportano i risultarti di una tipica prova in Idling.



Figura 2-11 – Andamento delle emissioni di NOX confrontate con i valori della velocità del motore in una prova di idling

Dal grafico si notano bene gli step di circa 500 rpm e le conseguenti variazioni del livello di emissioni di NOx.

Oltre agli andamenti a carico minimo, per costruire un modello di consumi ed emissioni sono necessari gli andamenti a carico massimo. Si effettua quindi la prova a potenza massima, da cui si ottengono le curve di potenza e di coppia del motore.

La prova a potenza massima si effettua accelerando e cambiando marcia sino a innestare la quarta marcia, dopodiché si rallenta sino al minimo regime sostenibile per poi spalancare l'acceleratore fino a far guadagnare al motore tutti i giri di cui è capace.

Si riportano in Figura 2-12 risultati di una tipica prova di potenza massima.

Per completare le mappe emissive e di consumi sono necessari gli andamenti ai carichi intermedi, compresi tra quello minimo e quello massimo. Proprio a questo scopo si effettuano le prove a numero di giri costante.

Nella prova a numero di giri costante, il banco a rulli, imponendo una resistenza variabile, consente che la velocità angolare del motore rimanga fissa mentre variando la posizione dell'acceleratore otteniamo una variazione del carico.

Si imposta quindi sul banco un valore dei giri motore e si procede a step spingendo di volta in volta l'acceleratore sempre più a fondo. Anche in questo caso ad ogni step si attendono alcuni secondi per permettere la stabilizzazione degli inquinanti misurati.

Molto importante è effettuare il maggior numero di step per ottenere curve il più possibile precise.





La prova viene effettuata con diversi valori del numero di giri, come minimo due, scelti all'interno del campo di utilizzo del motore. In genere si è utilizzato 2000 - 4000 rpm per le vetture con motorizzazione ad accensione comandata e 1500 – 3000 rpm per le vetture ad accensione spontanea.

Il grafico in Figura 2-13 riporta i risultati di una prova effettuata su una vettura con motorizzazione ad accensione spontanea alla velocità angolare del motore fissa di 3000 rpm.

Per verificare e validare i modelli adottati, sono necessari dati riguardanti un normale uso delle vetture, sia in ambito urbano che extraurbano. Per simulare un uso di questo tipo sono state effettuate delle prove a moto vario. Questo tipo di prove consiste nel guidare la vettura sul banco come se si fosse su strada, con accelerazioni, frenate, soste, etc. Ad ogni prova si sono alternati alla guida diversi guidatori, in modo tale da tener conto di differenti stili di guida


Figura 2-13 - Andamento delle emissioni di NOx e del carico motore in una prova a numero di giri costante

# 2.4 I modelli per il calcolo dei consumi e delle emissioni di particolato istantanee dei veicoli a partire dai dati di funzionamento del motore

#### 2.4.1 Modelli per il calcolo dei consumi di veicoli

#### 2.4.1.1 Modello per motori ad accensione comandata

Il consumo istantaneo dei moderni veicoli ad accensione comandata è direttamente disponibile tra i dati OBD/CAN proprietari del costruttore. Qualora non si disponga del protocollo di comunicazione necessario per interpretare i dati lo si deve calcolare dagli altri dati disponibili.

Per calcolare il consumo istantaneo di combustibile in un motore sono necessari due parametri: la portata d'aria aspirata e il rapporto aria-combustibile. Qualora fossero tutti e due disponibili dal sistema elettronico di gestione del motore il calcolo risulta semplicemente dall'equazione [15]:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{m}_{air}}{AFR}$$

Qualora uno dei due parametri non fosse disponibile, è necessario fare delle ipotesi a seconda che sia il rapporto aria-combustibile o la portata a mancare.

Se è il primo parametro a mancare, si possono fare due ipotesi a seconda che il veicolo sia ad accensione comandata o ad accensione spontanea.

I moderni veicoli ad accensione comandata hanno un controllo molto stretto e a parte i primi secondi di avviamento del motore e la fase di pieno carico il rapporto ariacombustibile è quello stechiometrico. Per il pieno carico è sufficiente ricavare sperimentalmente la curva del rapporto aria combustibile a pieno carico in funzione del numero di giri.

Si può quindi sviluppare un semplice modello per la stima dell'AFR come segue.

- Carichi parziali: il rapporto aria combustibile è stechiometrico;  $\alpha = \alpha_{st}$ .
- Pieno carico: tale valore in genere è molto ricco e variabile col numero di giri, il range in genere và da 12 a 10;  $\alpha = \alpha(Rpm)$
- Rilascio: non c'è iniezione  $\alpha = \infty$ .

Se nei motori ad accensione comandata è la portata di aria a mancare si utilizza una procedura equivalente a quella utilizzata per il calcolo della potenza. Si pone quindi la portata funzione di carico e velocità angolare del motore e, con l'ipotesi di linearità tra carico e portata aspirata, si ricava in maniera analoga a quanto visto per coppia e potenza.

$$\dot{m}_{air} = \dot{m}_{air} (Load, Rpm)$$

Anche in questo caso, sono necessarie due curve in funzione del numero di giri motore e tutti i valori saranno funzione del carico motore. La modalità di costruzione delle curve è esattamente la stessa sviluppata per il calcolo della potenza e con le stesse due prove (a pieno carico e in "idle") si costruiscono le suddette curve.

# 2.4.1.2 Modello per motori ad accensione spontanea

Per il consumo dei veicoli Diesel, esso viene preso per tutte le vetture provate direttamente dalla linea CAN o OBD (a seconda del protocollo di comunicazione di ciascun veicolo). Ciò rende quindi non necessario sviluppare un modello di calcolo apposito basato sui parametri motoristici [15]. In Figura 2-14 sono riportati a titolo di esempio i valori di consumo istantaneo acquisiti dalla linea CAN di una FIAT Grande Punto diesel testata (come si vede nel capitolo 4 in questa sperimentazione). Nella Figura 2-15 è invece riportato un confronto fra i valori di consumi acquisiti dalla linea CAN e i consumi istantanei misurati durante i test. La discrepanza tra i due andamenti è sempre minore dell'1%.



Figura 2-14 – Esempio di valori del consumo istantaneo di carburante acquisiti da linea CAN in funzione di carico e numero di giri.



Figura 2-15 – Confronto fra gli andamenti istantanei del consumo acquisiti da linea CAN (o OBD) e misurati.

# 2.5 Modelli per il calcolo del consumo di particolato dei veicoli

# 2.5.1 Definizione del modello

Oltre alla modellizzazione del consumo è studiato un modello di calcolo che permettesse di stimare la quantità di particolato emessa da un'autovettura in base ai parametri motoristici rilevati dal sistema di strumentazione montato a bordo del veicolo [17] [38].

Lo studio del modello è stato effettuato su una Fiat Punto 1.4 Mjet. Essa è dotata di una motorizzazione ad accensione spontanea, quattro cilindri con cilindrata di 1400 cm<sup>3</sup>, della potenza di 57 kW. La vettura non è dotata di filtro antiparticolato (FAP).

Come detto in precedenza l'AVL 483 Micro soot sensor è un misuratore della concentrazione di soot, per il calcolo della massa emessa si utilizza la seguente formula:

$$m_{soot}(g) = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_{soot,i} \cdot \dot{Q}_{asp,i} \cdot \Delta t_{i}}{1000 \cdot \rho_{aria}}$$

dove:

- $C_{soot}$  è la concentrazione di soot rilevata dalla strumentazione AVL 483 Microsoot Sensor espressa in mg/m<sup>3</sup>.
- $\dot{Q}_{asp.}$  è la portata d'aria aspirata espressa in g/s.
- $\Delta t$  è l'intervallo di acquisizione della strumentazione espresso in secondi.
- $\rho_{aria}$  è la densità dell'aria alle condizioni standard pari a 1.293 Kg/m<sup>3</sup>.

Come si vede nella formula si utilizza la portata d'aria aspirata e non quella dei gas di scarico; quest'ultima infatti non è presente tra i parametri acquisiti dalla sensoristica di bordo del veicolo. La sostituzione non comporta comunque un errore rilevante.

L'obiettivo del modello che si vuole costruire è quello di determinare la quantità di soot emessa in base ai parametri motoristici forniti dal sistema elettronico del veicolo.

Tra i parametri forniti dal sistema elettronico del veicolo, quelli che maggiormente influenzano l'emissione di soot e su cui si è concentrata l'attenzione sono:

- il carico motore;
- il regime di rotazione;

Il "Calculated Load Value" (CLV) o load (carico motore), come stabilito dallo standard SAE J1979, nel caso di un veicolo Diesel, rappresenta il rapporto, espresso in termini percentuali, tra la portata di combustibile iniettata e quella massima iniettabile ad un certo numero di giri in condizioni standard (25°C e 760 mm Hg) ed è definito dalla seguente relazione [18]:

$$CLV\% = \frac{Actual\_fuel\_injected}{Max\_fuel\_injected@STP(Rpm) \cdot \left(\frac{P.baro}{29.92}\right) \sqrt{\frac{298}{Ambient_T + 273}} \cdot 100$$

dove:

- P\_baro è la pressione atmosferica in pollici di mercurio;
- Max\_fuel\_injected@STP(Rpm): portata massima di combustibile in funzione del numero di giri e nelle condizioni standard di 29.92 mmH<sub>2</sub>O e 298 K;
- Ambient\_T è la temperatura ambientale.

In sostanza il carico motore nei Diesel è, a meno di correzioni dovute alle condizioni ambientali, il rapporto tra la portata di combustibile iniettata attuale e quella massima a quel numero di giri.

Tra le altre proprietà riportate nella definizione di carico, lo stesso standard afferma che indica la percentuale di coppia erogata a quel numero di giri ossia c'è una relazione di linearità tra le due grandezze.

È quindi utile valutare l'entità della relazione di dipendenza della concentrazione di soot emessa dal carico e dal regime di rotazione; a tal fine, si è svolta una preliminare analisi che ha previsto l'impiego dei dati delle prove di simulazione stradale effettuate sul banco a rulli.

Nella Figura 2-16 nella Figura 2-17 sono mostrati gli andamenti della concentrazione volumica di soot in relazione ai due parametri motoristici presi in considerazione.



Figura 2-16 – Concentrazione volumica del soot in funzione del regime di rotazione in una prova di simulazione stradale al banco a rulli



Figura 2-17 – Concentrazione volumica del soot in funzione del carico motore in una prova di simulazione stradale al banco a rulli

Come si nota dalle Figura 2-16 e Figura 2-17, per entrambi i parametri non esiste una chiara correlazione con la concentrazione di soot emessa; tuttavia il carico motore sembra presentare una dipendenza più stretta.

Bisogna tenere conto che le due figure si riferiscono a dati istantanei (affetti da un certo errore legato alle prestazioni della strumentazione di misura) e che si riscontra un non perfetto allineamento tra i valori istantanei del carico e della concentrazione volumica di soot. Quest'ultima circostanza è da attribuirsi al fatto che in questo caso lo strumento di misura utilizzato è l'AVL 483 Microsoot Sensor che rileva le concentrazioni di soot al terminale di scarico del veicolo dove gli inquinanti giungono con un certo ritardo ed un appiattimento rispetto a quando sono prodotti al motore. Essendo il tempo impiegato dai gas combusti a percorrere il condotto di scarico variabile con il regime di rotazione, non risulta possibile riallineare rigorosamente i dati semplicemente traslando indietro nel tempo la misurazione della concentrazione volumica di soot.

Si è scelto quindi di basare il modello di calcolo della concentrazione volumica del soot sul solo carico motore:

soot 
$$\left(\frac{mg}{m^3}\right) = f(load)$$

L'andamento scelto è quello lineare, con un aumento costante delle emissioni all'aumentare del carico, risulterà quindi:

$$soot\left(\frac{mg}{m^3}\right) = A + B \cdot load$$

Tuttavia, tenuto conto della dispersione che caratterizza tali dati e considerando che i valori istantanei rilevati sono afflitti da una certa incertezza di misura, per una più precisa individuazione del legame esistente tra le due grandezze è preferibile costruire la medesima curva effettuando prove in condizioni di funzionamento stazionario.

Si sono effettuate una serie di prove a numero di giri costante e carico variabile, già descritte in precedenza, in particolare, si opera in modo di mantenere il carico costante per un certo periodo di tempo, circostanza che rende meno gravosa la misura per la strumentazione e che consente inoltre di ridurre le incertezze associate alle grandezze registrate mediando i valori del soot e del carico nell'arco della intera prova.



Figura 2-18 – Andamento della concentrazione volumica di soot in funzione del carico in prove stazionarie

Nella Figura 2-18 sono riportati i valori ottenuti in prove a velocità costante per diversi valori del carico; si possono quindi attribuire i valori alle costanti A e B presenti nella formula del modello adottato, che risulterà quindi:

$$soot(\frac{mg}{m^3}) = 0.03 + 0.286 \cdot load$$

#### 2.5.2 Verifica del modello

Si riporta ora il risultato dell'attività svolta per la validazione del modello adottato per l'emissione di particolato.

Affinché le prove sperimentali fossero il più vicine alle reali condizioni operative dell'autovettura in esame, si è ritenuto di validare il modello attraverso prove su strada su percorso urbano.

E' stata quindi montata a bordo la strumentazione di rilevazione della concentrazione volumica del soot AVL 483 Micro Soot Sensor, come mostrato nella figura 4.4, oltre alla già presente strumentazione di bordo per l'acquisizione dati dal sistema elettronico di controllo e diagnosi del veicolo (EOBD).



Figura 2-19 – Fiat Grande Punto 1.4 con strumentazione AVL 483 Micro Soot Sensor a bordo

Le prove sono state effettuate su percorsi urbani diversi, in condizioni di normale traffico cittadino con l'utilizzo di due differenti guidatori.

La durata delle prove varia dai 5 ai 18 minuti.

In particolare si prendono in esame due particolari prove, della durata rispettivamente di 10 e 18 minuti; sono state effettuate su percorsi urbani dalle caratteristiche diverse ed effettuate da due diversi guidatori.

Nelle Figura 2-20 e Figura 2-21 si riportano gli andamenti della velocità delle due prove in esame.

Come si vede dai grafici in Figura 2-20 e Figura 2-21 e dalla Tabella 2-3 la prova 1 è stata effettuata in ambito prettamente urbano, nel centro storico di Roma, in condizioni di elevato traffico, la velocità media risulta estremamente bassa e l'andamento del profilo di velocità mostra le continue fermate e ripartenze tipiche di questa condizione.

La prova 2 è caratterizzata invece da velocità più elevate, è stata infatti eseguita sempre in ambito urbano ma su strade a più alto scorrimento e in una zona più

periferica della città, sono comunque presenti anche in questa prova arresti e ripartenze dovuti al traffico e ai semafori.



Figura 2-20 – Andamento della velocità in una prova stradale per la validazione del modello



Figura 2-21 – Andamento della velocità in una prova stradale per la validazione del modello

	Prova 1	Prova 2
Velocità media (km/h)	43.28	16.51
Velocità massima (km/h)	91.36	53.24

Tabella 2-3 – Caratteristiche di velocità delle prove stradali per la verifica del modello.

Per analizzare le prestazioni del metodo sviluppato si riportano di seguito dei grafici che mettono a confronto i valori calcolati dal modello con quelli rilevati dalla strumentazione di riferimento sia dal punto di vista delle portate in massa, per verificare se istante per istante si ha la coincidenza tra i due andamenti, sia da quello dei valori integrali, per esaminare se anche i valori cumulativi coincidono nell'arco delle prove. Dal punto di vista analitico, si deve tuttavia osservare che i valori istantanei risultano difficilmente comparabili per via delle fluttuazioni che li caratterizzano, dei più significativi errori di misura in tali condizioni dinamiche di rilevamento, anche a seguito del non perfetto riallineamento dei profili descritto in precedenza.

Alla luce di ciò, per confrontare dal punto di vista quantitativo il modello con il riferimento, appare più significativo confrontare istante per istante gli andamenti integrali (cioè cumulativi) delle emissioni, verificando se durante tutto l'arco della prova si sono manifestati scostamenti significativi tra le due serie storiche.



Figura 2-22 – Andamenti istantanei della concentrazione di soot calcolati dal modello e misurati dalla strumentazione AVL, durante una prova su strada



Figura 2-23 – Andamenti integrali della produzione di soot calcolati dal modello e dalla strumentazione AVL in una prova su strada



Figura 2-24 – Andamenti istantanei della concentrazione di soot calcolati dal modello e misurati dalla strumentazione AVL durante una prova stradale



Figura 2-25 – Andamenti integrali della produzione di soot calcolati dal modello e misurati dalla strumentazione AVL durante una prova stradale

	Prova 1	Prova 2
Coefficiente di correlazione andamenti istantanei	0.439	0.386
Coefficiente di correlazione andamenti integrali	0.989	0.998
Soot, modello (mg)	80.442	68.961
Soot, AVL (mg)	82.581	66.174
Errore percentuale (%)	2.659	4.041

Tabella 2-4 – Confronto del modello con i dati rilevati dalla strumentazione AVL nelle prove su strada

Si nota sia dai grafici in Figura 2-24 che in Figura 2-25 che dalla Tabella 2-4, che il modello adottato non segue precisamente gli andamenti istantanei delle emissioni di soot misurati; i coefficienti di correlazione risultano infatti relativamente bassi. Tuttavia il modello risulta estremamente preciso nella valutazione degli andamenti integrali delle emissioni con coefficienti di correlazione vicini all'unità e con errori percentuali sulla quantità totale di soot emesso alla fine delle prove compresi tra il 2 e il 4 %.

# 2.5.3 Modello Soot – Particolato

La strumentazione AVL 483 Micro Soot Sensor a disposizione è in grado di rilevare solo la concentrazione di soot presente nei gas esausti. Essendo la frazione carboniosa (soot) solo uno dei componenti del particolato, si è utilizzato un modello fisico-matematico per ricavare le quantità delle altre frazioni.

Nella Figura 2-26 si riportano ancora una volta le frazioni che compongono il particolato, evidenziando quella realmente misurata e quelle ricavate tramite modello; le quantità percentuali indicate rappresentano quelle tipiche emesse da un motore diesel di un veicolo pesante. [19][20]



Figura 2-26 – Composizione del particolato (PM) emesso da un motore ad accensione spontanea.

I principali componenti sono tre: la frazione carboniosa, la frazione organica e quella di solfato.

La frazione organica (SOF) che viene misurata come parte del particolato non è una variabile indipendente, ma una conseguenza prevedibile in base alla quantità di soot, alla concentrazione di HC e alle condizioni di campionamento.

Gli idrocarburi incombusti sono sempre presenti nel gas di scarico e derivano dalla combustione incompleta che si verifica a causa di:

- non totale vaporizzazione del combustibile;
- riempimento da parte del combustibile di cavità interne alla camera di combustione (come il gioco cilindro-pistone) dove il fronte di fiamma non si propaga;
- presenza di olio lubrificante in camera di combustione: è esso stesso una fonte di incombusti.
- Inoltre, è in grado di adsorbire il combustibile durante la fase di compressione; quando poi viene rilasciato nella successiva fase di espansione, questo è soggetto ad un'ossidazione con velocità minore rispetto a quella tipica della combustione, con conseguente produzione di idrocarburi incombusti;
- spegnimento della fiamma (quenching) in vicinanza delle pareti della camera, che risultano più fredde.

Recenti studi hanno stabilito che il rapporto tra la frazione carboniosa e quella organica è lineare con l'andamento degli HC secondo la formula [19]:

$$\frac{\dot{m}_{SOF}}{\dot{m}_{soot}} = \alpha \cdot HC$$

 $con \ \alpha = 0,035$ 

Per quanto riguarda la frazione di solfato, ricordiamo che la sua formazione è caratterizzata da tre fasi principali:

1) Formazione di SO<sub>3</sub> in un convertitore catalitico:

$$2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3$$

Essa dipende principalmente da tre fattori: contenuto di zolfo del combustibile, temperatura del catalizzatore, condizioni operative del catalizzatore.

2) In presenza di acqua, l'SO<sub>3</sub> reagisce producendo acido solforico, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

 Dalle molecole di H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e acqua si formano nel tunnel di diluizione particelle di solfato attraverso un processo di etero nucleazione.

Per il calcolo della portata in massa della frazione di solfato si usa la seguente formula [19]:

$$\dot{m}_{SO_4} = K \cdot \dot{m}_{fuel} \cdot w_{sulfur} \cdot \frac{M_{H_2SO_4} + x \cdot M_{H_2O}}{M_{sulfur}}$$

dove:

- K è il fattore di conversione dell'SO<sub>3</sub>;
- w<sub>sulfur</sub> è il contenuto di zolfo del combustibile;
- *m*<sub>fuel</sub> è la portata in massa di combustibile;
- x è il rapporto di idratazione;
- $M_{H_2SO_4}$  è la massa molecolare dell'acido solforico;
- $M_{H_2O}$  è la massa molecolare dell'acqua;
- *M<sub>sulfur</sub>* è la massa atomica dello zolfo.

Il fattore K dipende dalla temperatura del catalizzatore e dalle sue condizioni operative (GHSV = Gas Hourly Space Velocity) come mostrato nella Figura 2-27.



Figura 2-27 - Composizione del particolato (PM) emesso da un motore ad accensione spontanea.

Il modello appena descritto è stato applicato ad una prova di simulazione stradale effettuata al banco a rulli. La prova ha una durata di circa 15 minuti ed è stata effettuata su una vettura con motorizzazione ad accensione spontanea. Per la rilevazione della concentrazione degli HC è stata utilizzata la strumentazione Horiba OBS 1300. Al posto della temperatura del convertitore catalitico, non disponibile, è stata utilizzata quella dei gas di scarico, anch'essa rilevata con la strumentazione Horiba OBS 1300.

Si riportano nella Tabella 2-5 le singole quantità delle frazioni emesse ed il totale del particolato, sia per quanto riguarda l'intera prova che come emissioni al chilometro.

	Frazione carboniosa (soot)	Frazione organica (SOF)	Frazione solforosa (SUL)	Particolato (PM)
Quantità [mg]	352.64	4.60	42.85	400.09
Quantità al km [mg/km]	26.99	0.35	3.28	30.63
Percentuale in massa (%)	88	1.2	10.8	100

Tabella 2-5 – Emissioni delle singole frazioni costituenti il particolato durante una prova di simulazione stradale al banco a rulli

Come si nota dalla tabella 4.15 la frazione organica risulta essere quella meno rilevante all'interno della composizione del particolato; ciò non deve sorprendere dal momento che questa frazione è strettamente dipendente dalla quantità di HC emessa dal motore

in esame. Nei motori ad accensione spontanea e soprattutto in quelli di ultima generazione le emissioni di HC sono infatti molto basse, e nelle sperimentazioni eseguite per lo svolgimento di questo lavoro erano spesso al limite della sensibilità dello strumento utilizzato per la loro rilevazione.

Più rilevante risulta essere la frazione solforosa, ma appare chiaro come, dal punto di vista delle emissioni in massa, il particolato emesso dall'autovettura in esame sia formato principalmente dalla frazione carboniosa (soot).

Si riporta in Figura 2-28 il grafico delle emissioni in massa istantanee del soot e della frazione solforosa (SUL) riguardante una porzione temporale della prova di simulazione stradale effettuata sul banco a rulli.



Figura 2-28 – Grafico dell'andamento delle emissioni in massa della frazione carboniosa (soot) e della frazione solforosa (SUL) durante una prova di simulazione stradale effettuata sul banco a rulli

# 3 Metodologia di analisi delle prestazioni energeticoemissive di veicoli

#### 3.1 Obiettivi dello studio

Lo scopo di questo capitolo è quello di qualificare e quantificare in maniera più oggettiva possibile il rendimento globale, i consumi e l'autonomia del veicolo in prova nelle reali condizioni di utilizzo dal punto di vista energetico.

L'analisi si concentra sulle prestazioni del veicolo, non solo in termini di consumo di combustibile, ma anche in termini di efficienza con cui tale combustibile viene utilizzato.

I risultati di questa quantificazione su cicli reali vengono mostrati tenendo conto delle esperienze avute su differenti veicoli con differenti tipologie di powertrain.

Tale studio fornisce inoltre dati utili al fine di una valutazione dei limiti e dei vantaggi offerti da nuove tecnologie di accumulo e di propulsione.

#### 3.2 Definizione dell'indicatore rendimento globale

Si definisce l'indicatore rendimento globale come il rapporto tra il fabbisogno energetico alle ruote [kWh] e l'energia totale del veicolo [kWh]:

$$\eta_{G} = \frac{FE_{Ruote}}{E_{comb} + E_{Ele}} = \frac{\int_{o}^{t} [P_{tot}] dt}{[l_{comb} \cdot PCI \cdot \rho_{comb}] + \left(\frac{1}{\eta_{carica/Scarica}}\right) \int_{o}^{t} [v(t) \cdot i(t)] dt}$$

 $FE_{Ruote}$  è il fabbisogno energetico alle ruote [21]:

$$FE_{Ruote} = \int_{o}^{t} [P_{tot}] dt$$

 $P_{tot}$  è la potenza totale:

$$P_{tot} = P_{in} + P_{rot} + P_{aero}$$

 $P_{in}$  è la potenza inerziale, cioè quella richiesta per accelerare il veicolo o quella potenzialmente disponibile in fase di decelerazione:

$$P_{in} = m \cdot a \cdot v$$

Dove:

- *m* massa [kg];
- *a* accelerazione [m/s<sup>2</sup>];
- v velocità [m/s].

La potenza inerziale  $P_{in}$ , è positiva quando il veicolo accelera e negativa quando il veicolo è frenato. La quota parte di energia che si dissipa in frenata è potenzialmente

recuperabile, questa potenza è calcolata al al netto delle perdite dissipativa (interazione pneumatico-asfalto e resistenze aerodinamiche).

Prot è la resistenza al rotolamento

$$P_{rot} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha \cdot v$$

Dove:

- *g* è l'accelerazione gravitazionale [m/s<sup>2</sup>];
- $f = 0.013 + 6.5 \cdot 10^{-6} \cdot v^2$  è il coefficiente di rollio;

 $P_{aero}$  è la potenza aerodinamica:

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aria} \cdot C_x \cdot A \cdot v^3$$

Dove:

- $\rho_{aria}$  è la densità dell'aria [kg/m<sup>3</sup>];
- $C_x \cdot \dot{e}$  il coefficiente di resistenza;
- $A \ge l'$ area frontale del veicolo [m<sup>2</sup>].

Il fabbisogno energetico alle ruote è calcolato come differenza tra l'energia in ingresso alle ruote e quella in uscita (dissipata in frenata), al netto delle perdite di natura dissipativa.

*E<sub>comb</sub>* è l'energia di combustibile consumata:

$$E_{Comb} = l_{comb} \cdot PCI \cdot \rho_{comb}$$

Dove:

- *l<sub>comb</sub>* sono i litri di combustibile;
- *PCI* è il potere calorifico inferiore [Wh/kg];
- $\rho_{comb}$  è la densità del combustibile [kg/l].

 $E_{Ele}$  è l'energia elettrica consumata al contatore:

$$E_{Ele} = \left(\frac{1}{\eta_{carica/Scarica}}\right) \int_{0}^{t} [v(t) \cdot i(t)] dt$$

Dove:

•  $\eta_{Carica/Scarica}$  è il rendimento di carica/scarica delle batterie di trazione del veicolo.

Il rendimento globale, come definito precedentemente, tiene contro anche dell'energia recuperata in frenata, quindi minore è l'energia in frenata recuperata dal veicolo tanto più il rendimento diminuisce.

Nella figura seguente si vede come in questo caso si considera anche l'energia negativa e non solo quella positiva.



Figura 3-1 – Potenza alle ruote sul ciclo ECE

Non tenendo in conto delle forze di natura conservativa, ed in particolare di quelle inerziali, questo indicatore risulta quasi del tutto svincolato dal ciclo di marcia lungo il quale il veicolo è condotto, ed indica quanto il veicolo esaminato sia vicino al veicolo ideale (un rendimento globale pari al 100% significherebbe che tutta l'energia chimica ed elettrica viene usata per vincere le sole forze dissipative). Ad un rendimento globale più alto chiaramente corrispondono prestazioni energetiche migliori.

# 3.3 Analisi delle prestazioni energetiche di un veicolo ibrido Plug-in

# 3.3.1 Modalità di svolgimento dell'analisi

Come già introdotto nei capitoli precedenti, la determinazione dei consumi e delle emissioni in condizioni di riferimento standardizzate non fornisce un quadro realmente rappresentativo dell'impatto ambientale ed energetico, in quanto nell'uso reale diversi fattori difficilmente controllabili incidono considerevolmente su tali aspetti [22].

Sia i consumi che le emissioni dipendono infatti dal tipo di percorso effettuato e dallo stile di guida dello stesso conducente. Le prove standardizzate (Capitolo 1) sono condotte su banchi dinamometrici in condizioni ottimali che non possono evidentemente riprodurre l'ampio grado di variabilità dell'uso reale.

I dati indicati dalla casa madre sono relativi ad un ciclo di omologazione che è diverso da un ciclo reale urbano.

Il primo aspetto quindi curato nell'analisi è stato quello di definire un percorso (Figura 3-2) che per caratteristiche delle strade, lunghezza e traffico sia una rappresentazione

della media degli itinerari urbani, il secondo di stabilire un campione di conducenti rappresentativo della popolazione dei guidatori cittadini.



Figura 3-2 - Mappa del percorso di prova

In base agli studi analizzati in letteratura, il percorso medio giornaliero procapite di un italiano risulta essere pari a 22,8 [km] e lo spostamento medio giornaliero procapite pari a 7,6 [km]. Per una media di spostamenti giornalieri procapite pari a 3,0 [km].

Il ciclo scelto, rappresentato in figura, grazie al mix di strade a scorrimento, di quartiere, a viabilità minore e all'alternanza delle pendenze con arrivo alla stessa quota geodetica della partenza, riproduce uno spostamento medio urbano.

La sua lunghezza complessiva è di circa 4,5 [km]. Per ricreare il più possibile uguale il percorso medio giornaliero procapite, vengono effettuate 5 ripetizioni, percorrendo in totale circa 22,5 [km].

L'analisi ha coinvolto guidatori di sesso femminile e maschile, con un età sopra e sotto i 30 anni (come suddivisi dalle compagnie di assicurazione). In totale il campione è rappresentato da 18 guidatori, 12 uomini e 6 donne.

Ogni singola prova è realizzata con il SOC completamente carico.

La procedura eseguita, prima di cominciare il percorso, consiste nel registrare, mediante lettura sul display del cruscotto, i chilometri che il veicolo dichiara di poter percorrere in modalità di solo elettrico e successivamente di collegare il pc all'ELM327 e questo, a sua volta, alla presa OBDII del veicolo. Infine si effettua la connessione con il software in dotazione alla centralina del veicolo.



Figura 3-3 – Esempio di svolgimento dell'analisi

I parametri necessari al calcolo dei consumi e del rendimento sono:

- Velocità del veicolo, espressa in [km/h]
- Giri del motore a combustione, espressi in [rpm]
- Portata d'aria del motore a combustione, espressa in [g/s]
- Rapporto di equivalenza α

La velocità occorre per determinare la lunghezza degli spostamenti, gli rpm per identificare l'istante in cui si è passati in modalità ibrida con l'accensione del motore a scoppio. La portata d'aria del motore ed il rapporto di equivalenza per ottenere la portata di combustibile, sempre espressa in [g/s], con cui è possibile risalire poi ai consumi del veicolo.

La centralina a cui connettersi è la ECU1 ed i rispettivi PIDs da selezionare sono i numeri 0D, Velocità veicolo [km/h]; 0C, Giri del motore [rpm]; 10, Portata d'aria [g/s] e 44, Commando rapporto d'equivalenza.

Una volta terminata la prova i dati acquisiti dal software vengono salvati su file di testo e post-processati mediante un programma di calcolo numerico.

Tale programma è strutturato in maniera tale da eseguire le seguenti operazioni:

- Formattazione del tempo fornito in hh:mm:ss nella forma in secondi
- Allineamento temporale dei parametri
- Metodo delle parabole come integrazione numerica da applicare per determinare il valore dei km percorsi
- Calcolo della portata di combustibile attraverso la portata d'aria ed il rapporto di equivalenza
- Metodo delle parabole come integrazione numerica della portata di combustibile per determinare il valore del combustibile consumato nella prova.
- Calcolo dei consumi del veicolo, espressi in [km/l] e [l/100km] a partire dalla conoscenza dei km percorsi e del combustibile utilizzato.
- Eliminazione dei dati in cui compaiono rpm maggiori di zero
- Metodo delle parabole come integrazione numerica da applicare per determinare il valore dei km percorsi in modalità EV

L'allineamento temporale dei parametri è un'operazione necessaria in quanto gli indici temporali delle grandezze risultano generalmente sfalsati.

Per poter utilizzare i valori acquisiti relativi alla portata d'aria è però necessaria una correzione. Quando il veicolo percorre il ciclo in modalità di solo elettrico il software rileva una portata d'aria nel motore a combustione diversa da zero (pari all'incirca a 0,17 g/s), nonostante questo sia spento; ciò comporta che quando viene calcolata la portata di combustibile, come illustrato nella formula di seguito, si ottiene un valore diverso da zero, con il risultato di avere un consumo di carburante anche quando il motore a scoppio non è funzionante.

$$m_c = \frac{\phi \cdot m_a}{\alpha_s}$$

- m<sub>c</sub> = portata di combustibile [g/s]
- m<sub>a</sub> = portata d'aria [g/s]
- α<sub>s</sub> = rapporto stechiometrico pari a 14,7
- Φ = rapporto di equivalenza

Per ovviare a questo problema, vengono annullati tutti i valori della portata d'aria minori o uguali a 0,2 g/s.

		1 1 11		1 1 1 11		
Tabella 3-1 – Esempio di	correzione del	valore della	portata d'aria e	calcolo dello	o spazio	percorso

Тетро	Giri del motore	Veloci veic	tà del olo	Portata d'aria	Portata d'aria corretta	Rapporto di equivalenza	Sj	pazio percor	80
s	rpm	km/h	m/s	g/s	g/s	Φ	m	m	km
0	0	4	1,111	0,18	0	0,999424	1,1113	22818,71	22,81871
0,5	0	4	1,111	0,18	0	0,999424	0		
1	0	4	1,111	0,18	0	0,999424	1,7434		
1,5	0	6,649	1,846	0,18	0	0,999424	0		
2	0	7,366	2,046	0,18	0	0,999424	2,3549		
2,5	0	8,166	2,268	0,18	0	0,999424	0		
3	0	10,802	3,000	0,18	0	0,999424	3,3723		

# 3.3.2 Strumentazione di misura

La strumentazione di misura utilizzata si compone quindi di:

- 1 PC portatile
- 1 interfaccia hardware ed un cavo di connessione tra il PC e la ECU
- 1 software

L'interfaccia hardware è il dispositivo ELM327 ed il software selezionato è Scanmaster-ELM.

Come nell'analisi della carica, anche nello studio energetico del veicolo la strumentazione di bordo "dialoga" con la centralina elettronica di controllo del motore ECU (Electronic Control Unit), attraverso la presa diagnostica OBDII, per visualizzare in tempo reale tutti i parametri di funzionamento caratteristici del veicolo.

# 3.3.3 Caratterizzazione dei cicli di marcia

Il percorso stabilito è caratterizzato da un ciclo di marcia come quello esempio illustrato nella Figura 3-2 e presenta mediamente una velocità media di 16,56 [km/h] e una velocità massima di circa 67 [km/h].



Figura 3-4 – Esempio di ciclo di marcia reale urbano utilizzato nello studio energetico del veicolo

Durante la prima parte della prova il veicolo utilizza solamente il motore elettrico e ciò lo si è verificato seguendo la variazione dei giri del motore. Quando questi sono nulli, con il veicolo in moto, l'autovettura sta procedendo in modalità di puro elettrico.



Figura 3-5 – Ciclo di marcia in modalità EV

Il motore a combustione viene chiamato in causa solamente nel caso in cui la richiesta di potenza risulta essere maggiore di quella generata dal solo motore elettrico e ciò si verifica, o in caso di una notevole accelerazione o quando viene superata una velocità limite (la casa costruttrice dichiara 100 [km/h]).

La Figura 3-6 mostra una fase della prova in cui, in modalità EV, una forte accelerazione ha provocato l'accensione del motore termico.



Figura 3-6 – Accensione del motore termico in modalità EV

Quando la capacità delle batterie termina, il veicolo passa in modalità HV e si comporta come un normale veicolo ibrido serie- parallelo, in cui il motore a combustione viene sfruttato con maggiore continuità.



Figura 3-7 – Distinzione della fase EV dalla fase HV in funzione dei giri del motore termico



Figura 3-8 – Funzionamento del motore termico in modalità HV

# 3.3.4 Valutazione dei risultati

La Tabella 3-2 presenta gli esiti della campagna di acquisizioni riguardanti i consumi, intesi in media.

Spazio percorso	Combustibile	ombustibile Consumi	
[km]	consumato [l]	nsumato [l] [km/l] [l/	
22.39	0.49	46.07	2.31

Tabella 3-2 - Riassunto dei principali risultati ottenuti dalla campagna di acquisizioni

La lunghezza media percorsa è risultata essere pari a 22.39 [km], i litri di benzina impiegati 0.49 ed i consumi medi calcolati sono stati di 46.07 [km/l].

La figura 70 mostra che nel 61 % delle missioni i guidatori hanno percorso tra i 30 ed i 50 chilometri con un litro. Si nota come nessun soggetto del campione ha registrato un consumo inferiore ai 25 [km/l], ed una piccola percentuale ha percorso più di 70 chilometri con un litro.





La Tabella 3-3 presenta invece i consumi, sempre espressi in media, del veicolo quando funziona da ibrido, ovvero in modalità HV.

La Figura 3-10 mostra che nel 65 % delle missioni i guidatori hanno percorso tra i 16 ed i 20 chilometri con un litro. In nessuna missione si sono registrati consumi inferiori ai 10 [km/l], né superiori ai 22 [km/l].

Tabella 3-3 – Consumi del veicolo in modalità HV



Figura 3-10 – Distribuzione percentuale dei consumi [km/l] ottenuti durante l'analisi energetica del veicolo funzionante in modalità HV

Per quanto riguarda i chilometri realmente coperti in solo elettrico, questi risultano minori rispetto a quelli dichiarati dalla strumentazione del veicolo, precisamente in media si ha una riduzione del 18,5% che corrisponde a 3,77 km percorsi in meno.

Tabella 3-4 –	Riassunto dei	principali	risultati	ottenuti	dalla	campagna	di	acquisizior	۱i
	Massunto dei	principan	isuitati	ottenuti	ualla	campagna	u	acquisizioi	

Spazio percorso [km]	Spazio teorico in EV	Spazio reale in EV	Varia	azione
	[km]	[km]	∆km	%
22,39	20,54	16,77	3,77	18,50

Tale risultato sottolinea il grande impatto che il ciclo reale ha sui consumi energetici del veicolo e di come le condizioni ottimali con cui vengono svolte le prove di omologazione siano lontane da quelle reali.

Dai risultati emerge un dato interessante, la classe di guidatori i cui consumi sono in media maggiori presentano una riduzione minore dei chilometri percorribili in modalità EV

Il funzionamento del veicolo come veicolo puramente elettrico ha un peso determinante sui consumi complessivi, questi infatti risultano tanto maggiori quanto minori sono i chilometri percorsi in modalità ibrida.

Per tale ragione non è possibile stabilire un confronto diretto con i consumi dichiarati dalla casa costruttrice, stimati in 50,7 [km/l], in quanto non è nota la lunghezza del percorso del ciclo standard applicato.

Di conseguenza risulta di maggiore utilità definire i consumi del veicolo in funzione dei km percorsi in totale, tenendo sempre conto di una prima parte effettuata in modalità elettrica. Il legame tra le due grandezze è rappresentato dalla formula di seguito, nella quale vengono tenuti conto i valori calcolati nella campagna di acquisizioni.

$$C = \frac{X_{TOT}}{l_{EV} + \rho_{HV} \cdot X_{HV}}$$

- C = Consumi del veicolo in funzione dei chilometri percorsi [km/l]
- X<sub>TOT</sub> = Distanza percorsa totale [km]
- $L_{EV}$  = Litri di combustibile consumati nella distanza percorsa in modalità elettrica [1]
- ρ<sub>HV</sub> = Litri di combustibile consumati per chilometro percorso in modalità ibrida
  [l/km]
- $X_{HV}$  = Distanza percorsa in modalità ibrida [km]
  - $\circ$  X<sub>HV</sub> > 0 se X<sub>TOT</sub> > 16,77<sup>1</sup>
  - o  $X_{HV} = 0$  se  $X_{TOT} \le 16,77$

Sviluppando i calcoli si è ottenuto l'andamento mostrato in Figura 3-11.

Come si può notare, al crescere dei chilometri percorsi i consumi tendono ad aumentare, avvicinandosi sempre più al valore relativo ai consumi del veicolo in modalità ibrida, stimati 16,73 [km/l], dove l'effetto dei chilometri in elettrico è praticamente assente.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 16,77 km è la distanza percorsa in media in modalità elettrica nelle prove svolte



Figura 3-11 – Andamento dei consumi del veicolo in funzione dei chilometri percorsi

L'analisi svolta rivela un importante risultato, il veicolo se percorre con un'unica ricarica circa 80 km presenta dei consumi uguali a quelli dello stesso veicolo di ultima generazione non plug-in, pari a circa 20,5 [km/l], che diventano maggiori all'aumentare dei chilometri.

Per ottenere questo dato si è ipotizzato di aumentare i consumi dichiarati dalla Casa Produttrice, 25,6 [km/l], del 20%, come definito nei numerosi studi presenti in letteratura in cui si è determinato che in media i consumi reali dei veicoli ibridi sono superiori a quelli di omologazione del 20% [23].

Nonostante non vi siano ancora studi che dimostrino quest'ultimo dato, esso mette in luce un importante aspetto. L'efficacia della nuova tecnologia presente sul veicolo deve essere valutata a seconda dell'utilizzo nelle diverse tipologie di missione. Percorsi secondo le medie giornaliere esaltano la sua efficienza, mentre tragitti superiori riducono la sua capacità di contenimento dei consumi tanto più quanto maggiori sono i chilometri percorsi.

Il veicolo in esame al contrario esalta le sue prestazioni se applicata su cicli urbani per lunghi chilometraggi, non a caso in Italia ha conquistato un importante porzione di mercato rappresentata dai veicoli taxi. Proprio in merito a questa categoria la versione plug-in invece non risulterebbe una valida alternativa in quanto i consumi peggiori non giustificherebbero il maggiore investimento iniziale.

Il peggioramento dei consumi è dovuto principalmente all'aumento del peso del veicolo a causa dell'installazione dei nuovi accumulatori. La batteria al litio infatti pesa 160 kg contro i 40 del veicolo in esame, comportando un aumento del peso complessivo della vettura che passa da 1395 a poco più di 1500 kg.

La valutazione viene fatta considerando un'unica ricarica; risulta chiaro che se il numero delle ricariche giornaliere fosse superiore, il veicolo risulterebbe conveniente per un più ampio campo di utilizzazioni.

Al momento attuale però sul territorio non è ancora stata sviluppata un'adeguata impiantistica di rete e di comunicazione per la gestione della ricarica. Di conseguenza il successo di tale veicolo risulta strettamente connesso con la creazione di una valida infrastruttura per la distribuzione dell'energia elettrica, il più possibile ramificata all'interno dello spazio cittadino.

Le acquisizioni hanno permesso di esprimere anche i consumi di energia primaria del veicolo, espressi in [Wh/km]. La tabella di seguito elenca i risultati.

Energia di combustibile spesa [kWh]	Energia elettrica al contatore [kWh]	Spazio percorso [km]	Consumi [Wh/km]	
4,36	3,7	22,39	360,14	

Tabella 3-5 – Consumi energetici primari del veicolo in prova

L'energia elettrica spesa è ottenuta attraverso l'analisi di carica descritta nel precedente capitolo, mentre l'energia del combustibile spesa è ricavata a partire dalla conoscenza dei litri consumati in media, pari a 0,486.

Moltiplicando infatti questo valore per il potere calorifico della benzina, 43.333 kJ/kg, per la densità del combustibile, 0,74 kg/l, ed effettuando infine una conversione delle unità di misura J-Wh, viene ottenuto il valore energetico del combustibile utilizzato in media nelle prove svolte.

Sommando le due energie e dividendo il risultato per lo spazio percorso in media vengono ricavati infine i consumi di energia primaria del veicolo, pari a 360,14 Wh/km.

Questo valore non può essere confrontato con quelli presenti in letteratura, dove in mancanza di significative prove su campo, vengono espressi i consumi ipotizzando una ripartizione paritetica del flusso energetico (50% in puro elettrico e 50% in ibrido), per un totale di 390-420 Wh/km [24].

Anche in questo caso è risultato utile esprimere l'andamento dei consumi di energia primaria in funzione dei km percorsi. La formula di seguito rappresenta la legge funzionale tra le due grandezze in questione.

$$C_s = \frac{E_{EV} + \lambda_{HV} \cdot X_{HV}}{X_{TOT}}$$

- Cs = Consumi di energia al serbatoio [Wh/km]
- X<sub>TOT</sub> = Distanza percorsa totale [km]
- E<sub>EV</sub> = Energia elettrica al contatore [Wh]

•  $\lambda_{HV}$  = Energia chimica del combustibile consumata per chilometro percorso in modalità ibrida [Wh/km]



Figura 3-12 – Andamento dei consumi primari del veicolo in funzione dei chilometri percorsi

Come si può notare, al crescere dei chilometri percorsi i consumi tendono ad aumentare, avvicinandosi sempre più al valore relativo ai consumi del veicolo in modalità ibrida, stimati 532,24 [Wh/km], dove l'effetto dei chilometri in elettrico è praticamente assente. Nella prima parte i consumi sono costanti in quanto legati esclusivamente alla ricarica elettrica.

# 3.3.4.1 Rendimento globale

Un veicolo ibrido plug-in sfrutta l'energia elettrica immagazzinata negli accumulatori e quella chimica presente nel combustibile per vincere quattro principali tipi di forze, due di natura conservativa (forze gravitazionali e inerziali) e due di natura puramente dissipativa (interazione pneumatico-asfalto e resistenze aerodinamiche). Per quantificare la validità energetica del veicolo si è individuato l'indicatore rendimento globale, calcolato sul percorso già descritto precedentemente. Come definito precedentemente, esso è il rapporto percentuale tra l'energia necessaria per vincere le forze di natura dissipativa e quella consumata nel contempo sotto forma di energia elettrica e chimica.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 16,77 km è la distanza percorsa in media in modalità elettrica nelle prove svolte

La Figura 3-13 mostra gli esiti della campagna per quel che riguarda il rendimento globale [%] del veicolo. Il suo valore medio nelle missioni è risultato pari al 36%.

Come si nota, in più del 62% delle missioni l'autovettura ha fatto segnare valori di rendimento compresi tra il 30 ed il 45%. In nessuna missione si è ottenuto un rendimento inferiore al 20%, né superiore al 50% ed in meno del 7% delle missioni il rendimento globale si è attestato tra il 20 ed il 25%.



Figura 3-13 – Distribuzione percentuale del rendimento globale ottenuto durante le prove

Nell'analisi svolta si è ritenuto utile illustrare anche il suo andamento in funzione dei chilometri percorsi durante la prova.

Ovviamente per il calcolo del rendimento globale, quando il veicolo viaggia in modalità EV, a denominatore della formula non viene considerata l'energia chimica consumata.

Nei chilometri di autonomia in elettrico il valore del rendimento globale risulta essere pari a circa il 65%. Una volta terminata la capacità delle batterie, il veicolo si comporta da ibrido ed il rendimento globale diminuisce gradualmente fino a portarsi ad un valore di fine prova pari al 36%. Tale riduzione è dovuta al contributo del rendimento globale del veicolo in funzionamento ibrido che influisce negativamente su quello totale. Dalla campagna di acquisizione è infatti emerso un valore medio pari a circa il 15%.





Figura 3-14 – Rendimento globale in funzione dei chilometri percorsi durante le prove

Figura 3-15 – Rendimento globale in funzione della modalità di utilizzo del veicolo

#### 3.3.4.2 Influenza degli ausiliari sui consumi

I consumi finora esaminati riguardano esclusivamente quanto attiene la trazione. Per i veicoli moderni non si può tuttavia prescindere dai consumi degli ausiliari di bordo per

la climatizzazione (ventilazione, riscaldamento, condizionamento), per la sicurezza passiva (sbrinamento, riscaldamento lunotto posteriore, le luci) e da eventuali optionals (radio, navigatore).

Un ulteriore studio viene dedicato quindi alla valutazione dell'influenza, in termini di differenza percentuale sui consumi, degli ausiliari.

La prova si è svolta effettuando il percorso definito, una volta in condizioni di carico esclusivamente legato alla trazione ed una volta con l'aggiunta dei carichi ausiliari.

Il guidatore, le condizioni climatiche e gli orari scelti sono stati i medesimi.

Per riprodurre il più possibile fedelmente il percorso medio giornaliero non vengono utilizzati tutti gli ausiliari disponibili sul veicolo ma solamente quelli di maggior uso nel quotidiano. Di conseguenza è stato considerato l'impiego del condizionamento automatico, imposto a 24 [°C] con una temperatura esterna di 9 [°C], e sono state accese le luci di posizione e la radio.

I risultati delle acquisizioni hanno mostrato un aumento dei consumi circa del 21%, come riassunto nella Tabella 3-6.

Tabella 3-6 – Riassunto dei risultati ottenuti nella prova con l'utilizzo degli ausiliari in termini di consumi [km/I]

Consumi senza ausiliari	Consumi con ausiliari	Variazione
[km/l]	[km/l]	[%]
37,42	29,64	20,80

Il motivo della diminuzione dei chilometri percorsi con un litro di benzina è dovuto al consumo maggiore di energia immagazzinata nelle batterie al litio. Infatti la batteria ausiliaria da 12 [V] viene ricaricata direttamente dai 3 pacchi batteria.

Come mostrato nella Figura 3-16 e nella Figura 3-17 caso di accensione degli ausiliari il veicolo passa prima in modalità HV (testimoniato dagli rpm del motore termico), ricoprendo una minore distanza in solo elettrico. In questo modo il rendimento più basso del veicolo con funzionamento ibrido ha un peso maggiore rispetto al caso senza ausiliari, portando di conseguenza i consumi ad un valore più alto, passando da 37,42 a 29,64 [km/l].

In particolare i chilometri ricoperti in modalità elettrica senza ausiliari sono stati 17,55 mentre quelli con ausiliari 14,82, per una differenza di 2,7 [km] come mostrato in Tabella 3-7.



Figura 3-16 – Accensione del motore termico senza ausiliari



Figura 3-17 – Accensione del motore termico con ausiliari

Tabella 3-7 – Riassunto dei risultati ottenuti nella prova con l'utilizzo degli ausiliari in termini di chilometri percorsi in EV [km]

Percorso in EV senza ausiliari [km]	Percorso in EV con ausiliari [km]	Variazione [km]
17.55	14.82	2,73

#### 3.3.4.3 Ciclo Extraurbano

Nell'ultima parte dell'analisi vengono confrontati i consumi del veicolo su ciclo reale urbano con quelli su ciclo reale extraurbano.

Per determinare tale risultato in entrambi i casi, il guidatore e gli orari selezionati sono stati gli stessi, così come le condizioni atmosferiche. La lunghezza del percorso è stata scelta il più possibile prossima a quella del ciclo urbano e risulta essere pari a 22,36 [km].

Il ciclo di marcia extraurbano definito presenta l'andamento mostrato in ed è caratterizzato da una velocità media di 113,6 [km/h] ed una velocità massima di circa 140 [km/h].



Figura 3-18 – Ciclo di marcia reale extraurbano utilizzato nello studio energetico del veicolo Il veicolo si trova in partenza con le batterie completamente cariche.
Come si nota dalla Figura 3-19 il motore termico assiste costantemente la marcia su tutta la lunghezza del tracciato. Il motivo è legato all'alta richiesta di potenza che il ciclo richiede per mantenere delle velocità così elevate.

Il motore elettrico lavora parallelamente al motore a combustione, utilizzando tutta l'energia accumulata nelle batterie.



Figura 3-19 – Andamento del contributo del motore termico in funzione degli rpm durante il ciclo di marcia reale extraurbano

In simili condizioni il veicolo non viaggia mai in modalità EV ad emissioni zero e risulta scontato che questo comportamento influenzi negativamente sia i consumi che le emissioni.

Inoltre su un percorso privo di continui stop e ripartenze non viene sfruttato mai il grande vantaggio della frenata rigenerativa.

I valori elencati nella Tabella 3-8 mostrano i consumi del veicolo su ciclo extraurbano confrontati con quelli ottenuti su ciclo urbano.

La differenza risulta notevole, a dimostrazione del fatto che il veicolo in esame, nonostante la sua natura plug-in le consenta di sfruttare la capacità delle batterie, non è un veicolo adatto per un'applicazione extraurbana, il suo utilizzo migliore si ha all'interno dei limiti urbani, dove la possibilità di marcia in puro elettrico permette una forte riduzione dei consumi ed un migliore impatto ambientale.

#### Tabella 3-8 – Confronto dei consumi urbani ed extraurbani

Consumi E	xtraurbani	Consumi Urbani			
[km/l]	[l/100km]	[km/l]	[l/100km]		
16,33	6,12	29,29	3,41		

#### 3.3.5 Analisi del sistema di ricarica

#### 3.3.5.1 Obiettivi dello studio

L'analisi del sistema di carica del veicolo Plug-in si basa su due fondamentali tipologie di prove, denominate:

- 1. Carica completa
- 2. Carica parziale

Lo scopo della prova di carica completa è quello di qualificare e quantificare il funzionamento del sistema di carica del veicolo in questione quando viene eseguita una carica completa.

Per carica completa si intende la ricarica, mediante apposito connettore collegato alla rete, dei 3 pacchi batterie Main, Sub1 e Sub2 in dotazione, partendo da un valore del SOC (State of Charge) minimo, fino ad un valore di carica massima.

L'analisi si concentra in particolare sull'andamento della ricarica, giustificandone il comportamento, identificando i parametri caratteristici ed i fattori che maggiormente influiscono su di essa e confrontando in ultimo i valori ottenuti con quelli dichiarati dalla Casa Costruttrice.

L'obiettivo della prova di carica parziale è invece quello di caratterizzare il sistema di carica quando vengono effettuate delle cariche parziali.

Per carica parziale si intende la ricarica non completa delle batterie, partendo sempre da un valore minimo del SOC.

Nello specifico vengono svolte in successione cariche di durata crescente, in maniera tale da definire in funzione del tempo l'energia immagazzinata, espressa in kWh, ed i km teoricamente in grado di percorrere il veicolo in modalità di marcia di solo elettrico.

I km dichiarati sul display del veicolo vengono confrontati con quelli effettivamente percorsi su dei precisi cicli di marcia reali.

Quest'ultime prove permettono di valutare l'efficacia di una ricarica non completa e in particolare di determinare la durata di carica sufficiente ad assicurare un percorso giornaliero medio in modalità di solo elettrico.

L'importanza di analizzare le cariche parziali nasce dalla considerazione dell'esigenza di verificare l'eventuale possibilità di ottenere una ricarica rapida per sopperire al

fabbisogno giornaliero, nel caso in cui non si disponga dei 90 minuti necessari (circostanza verificabile durante la giornata di una qualsiasi persona).

# 3.3.5.2 Carica completa

### Strumentazione di misura

La strumentazione di misura è composta da tre apparati principali.

Il primo ha come fine quello di acquisire, secondo un determinato tempo di campionamento, i valori della corrente di carica del veicolo. Il secondo ha invece lo scopo di campionare i valori della tensione di alimentazione del veicolo. Il terzo ha infine l'obiettivo di acquisire, sempre secondo un opportuno tempo di campionamento, lo stato di carica delle batterie.

Sia l'apparato relativo alla misura della corrente che quello relativo alla tensione presentano i seguenti componenti:

- 1 circuito elettronico
- 1 Compact Field point (in comune)
- 1 Modulo input (in comune)
- 1 Blocco connettore (in comune)
- 1 PC portatile ( in comune)
- 1 Software (in comune)

Questi sono collegati tra di loro secondo la catena di misura rappresentata in Figura 3-21.



Figura 3-20 – Catena di misura per la prova di carica completa

Tutti gli elementi della catena di misura sono in comune tra i due apparati, l'unica differenza è data dai due circuiti elettronici realizzati.

Il circuito elettronico relativo alla misura della corrente è composto da un set di resistenze e da un ponte di Graetz.

Le resistenze sono alimentate direttamente dalla rete esterna e sono necessarie ad ottenere una determinata caduta di tensione. Infatti tale valore della caduta di tensione è applicato al ponte di Graetz, posto in parallelo, che è a sua volta collegato al Blocco connettore del Compact Field Point, il quale è progettato per lavorare secondo valori di tensione inferiori ai 220 V.

La misura totale delle resistenze scelte è di 0,33 Ω.



Figura 3-21 – Set di resistenze del circuito elettronico per la misura della corrente nella prova di carica completa

Il blocco connettore deve inoltre essere alimentato da una tensione continua, ecco perché a monte di esso viene posto il ponte di Graetz, il quale ha il compito di raddrizzare la tensione alternata fornita dalla rete.

Tale ponte è un circuito costituito da 4 diodi, una resistenza ed un condensatore, che sono collegati secondo il seguente schema.



Figura 3-22 - Schema del ponte di Graetz

La tensione sinusoidale in ingresso al circuito viene trasformata in uscita in una tensione che segue l'andamento tipico della figura B.





Nello specifico, per la realizzazione del ponte di Graetz sono stati utilizzati:

- 1 sochet
- 4 diodi 1N4001
- 2 condensatori da 220 μF
- Resistore di carico da 1 kΩ



Figura 3-24 – Ponte di Graetz

Il segnale output del circuito elettronico appena descritto, viene acquisito mediante l'utilizzo di un SAAD (Sistema di Acquisizione e Distribuzione dei Dati).

Nella prova è stato adoperato in particolare un Compact Field point della National Instruments, sul quale sono stati connessi un Modulo input NI cFP-TC-120 con un Blocco connettore NI cFP-CB.



Figura 3-25 – Modulo input NI cFP-TC-120 (A), Blocco connettore NI cFP-CB (CB)

Il segnale digitalizzato viene poi inviato via ethernet al computer nel quale, attraverso l'utilizzo di un software creato appositamente per la prova, viene acquisito e memorizzato. Il software è stato sviluppato mediante l'ambiente di programmazione *labVIEW* (*National Instruments*). In questo modo, una volta terminata l'acquisizione, si hanno a disposizione i valori della corrente durante tutto il periodo della prova.

Il circuito elettronico relativo all'acquisizione della tensione di alimentazione è composto da tre resistenze e da un ponte di Graetz. Le tre resistenze sono collegate in serie sul socket e agli estremi è applicata la tensione di alimentazione esterna, oggetto proprio della misura. Il ponte di Graetz è collegato in parallelo a due delle tre resistenze, in maniera da essere sottoposto ad una differenza di potenziale pari alla caduta di tensione sulle due resistenze stesse. Il ponte di Graetz anche in questo caso riveste la funzione di raddrizzatore del segnale da inviare in ingresso al Compact Field point. Nello specifico sono state utilizzate:

- 2 resistenze da 19,76 kΩ (in totale)
- 1 resistenza da 952 kΩ



Figura 3-26 – Schema del circuito elettronico per la misura della tensione

Per la realizzazione del ponte di Graetz sono stati impiegati:

- 1 socket
- 4 diodi 1N4001
- 2 condensatori da 220 μF
- 1 resistore di carico da 1 kΩ



Figura 3-27 – Circuito elettronico per la misura della tensione nella prova di carica completa

Come in precedenza, anche in questo caso, una volta terminata l'acquisizione si hanno a disposizione i valori della tensione di alimentazione al variare del tempo.

La catena di misura completa durante una prova di carica del veicolo, è mostrata nella figura Figura 3-28.



Figura 3-28 – Catena di misura per l'analisi della prova di carica completa

Il terzo ed ultimo apparato è costituito da una strumentazione di bordo *OBD*. Per strumentazione di bordo si intende l'insieme delle apparecchiature essenzialmente di carattere informatico, sia software che hardware, utilizzate per la raccolta dei parametri caratteristici di funzionamento del veicolo durante prove sperimentali.

La strumentazione di bordo "dialoga" con la centralina elettronica di controllo del motore *ECU* (*Electronic Control Unit*) grazie alla presa di diagnosi OBD sita nell'abitacolo del veicolo. Tale presa consiste nel connettore *OBDII* e rappresenta una porta di comunicazione utilizzata dal *sistema OBD* (*On Board Diagnostic*) per fornire all'esterno dati in tempo reale sul veicolo.

Il sistema OBD è un sistema standardizzato a livello mondiale che presenta la capacità di autodiagnosi e segnalazione di eventuali guasti/errori nell'autovettura.

Il sistema OBD è obbligatorio su tutte le vetture di nuova omologazione, a partire dal 2000 per quelle a benzina e dal 2003 per quelle diesel. In USA è già applicato dal 1994 a seguito del *Clean Air Act*, cioè la normativa antinquinamento.

La strumentazione realizzata impiega i seguenti componenti:

- 1 PC portatile
- 1 interfaccia hardware ed un cavo di connessione tra il PC e la ECU
- 1 software

Per interfaccia hardware si intende l'elettronica integrata nel dispositivo interposto

tra PC e presa diagnostica che permette di visualizzare tutti i parametri di funzionamento gestiti dalla centralina del veicolo e di interpretare i codici di errore.

Dei componenti elencati, il software, l'interfaccia ed il cavo per la comunicazione tra PC e ECU rispondono agli standard SAE e ISO.

Gli standard maggiormente utilizzati sono:

- VPM: SAE J1850 principalmente per veicoli General Motors
- PWM: SAE J1850 principalmente per veicoli Ford
- ISO 9141-2 principalmente per veicoli europei e asiatici
- KWP2000: SAE14230-4 principalmente per veicoli europei ed asiatici
- SAE J1979: per il protocollo di comunicazione

Il protocollo di comunicazione ha la funzione di definire l'espressione delle varie grandezze su cui si può interrogare la centralina, definendone il *PID*, cioè il Parameter Identification. Il PID viene utilizzato dal software per interrogare la

centralina, e quindi uno specifico sensore, sul valore della grandezza di interesse. Non appena la centralina ha fornito il valore richiesto, il software richiede il successivo a livello temporale.

Nello specifico della prova viene impiegata come interfaccia hardware il dispositivo *ELM327*.



Figura 3-29 – Interfaccia hardware ELM327

Il software selezionato è invece Scanmaster-ELM.



Figura 3-30 - Homepage del software Scanmaster-ELM

#### Modalità di svolgimento dell'analisi

Per iniziare la prova di carica vengono collegati alla presa elettrica da 16 A i circuiti elettronici ed il Compact Field point, quest'ultimo poi viene connesso, tramite cavo ethernet, al pc portatile. Contemporaneamente viene collegato l'altro pc all'ELM327 e questo, a sua volta, alla presa OBDII del veicolo.



Figura 3-31 – Presa diagnostica OBDII con Connettore ELM327

Non appena il veicolo viene messa in ricarica vengono lanciati i due programmi installati sui computer. Rispettivamente LabVIEW per l'acquisizione di corrente e tensione e Scanmaster per il valore dello stato di carica delle batterie (SOC). In

quest'ultimo caso per ottenere il SOC occorre connettersi, una volta apparsa la finestra che mostra le centraline rilevate dal programma, alla ECU3 e selezionare il PID numero 58, ovvero l'Hybrid Battery Pack Remaining Life [%].

Please sele	ct ECU	2
ECU	Description	
@STEA	CAN-ID ECU #3	
STEB	CAN-ID ECU #4	
\$7E8	CAN-ID ECU #1	
-		

Figura 3-32 – Centraline rilevate dal software Scanmaster

La prova termina quando la capacità delle batterie risulta satura, ciò viene segnalato dal veicolo stesso mediante lo spegnimento di una piccola luce color arancione posta sul pianale dell'auto. I dati così acquisiti dal programma di LabVIEW vengono salvati su file di testo e post-processati mediante un programma di calcolo numerico. Tale programma è stato strutturato in maniera tale da eseguire le seguenti operazioni:

- Sottrazione della caduta di tensione da ogni singolo valore della tensione acquisita, per ottenere il reale valore di alimentazione delle batterie
- Prodotto di ogni singolo valore di corrente con il corrispondente valore di tensione, per il calcolo delle potenze scambiate ad ogni istante di campionamento
- Metodo delle parabole come integrazione numerica da applicare per determinare il valore dell'energia della rete assorbita
- Calcolo della corrente media
- Calcolo della tensione media
- Calcolo della durata effettiva

Il valore della corrente non viene fornito direttamente dal file di testo elaborato da labVIEW; come infatti spiegato in precedenza, il Compact Field point rileva solamente un segnale in tensione e per tale ragione, al fine di ottenere il valore della corrente, è necessario dividere la caduta di tensione misurata con il valore ohmico del set di resistenze installate nel circuito.

Il post-processing viene applicato anche ai dati acquisiti da Scanmaster.

Il programma di calcolo numerico elaborato in questo caso effettua le seguenti operazioni:

• Formattazione del tempo fornito in hh:mm:ss nella forma in secondi

• Formattazione del tempo di campionamento secondo un tempo di maggiore praticità, scelto nello specifico pari a 0,5 s

Infine per completare la prova vengono registrati, mediante lettura sul display del cruscotto, i km che il veicolo dichiara di poter percorrere in modalità di solo elettrico.

#### Valutazione dei risultati

#### Caratterizzazione dell'andamento della ricarica

Dalla campagna di acquisizioni è stata innanzitutto confermata la procedura caratteristica di ricarica delle batterie al litio descritte nella letteratura.

Gli accumulatori Li-ion vengono caricati imponendo nella prima fase una corrente pressoché costante fino al raggiungimento del limite massimo della tensione della cella, imposto in circa 4,2 V, ed applicando nella seconda parte una tensione costante fino a quando la corrente non si annulla completamente.

La figura 49 mostra proprio tale comportamento, con l'unica differenza che la ricarica viene intervallata da due pause nelle quali il valore della corrente si abbassa di circa il 90%, come secondo l'andamento illustrato nella Figura 3-33.



Figura 3-33 – Andamento nel tempo dell'intensità di corrente di alimentazione delle batterie

La potenza scambiata con la rete subisce quindi due drastiche diminuzioni ed i motivi sono principalmente legati alla sicurezza delle batterie stesse.



Figura 3-34 – Andamento nel tempo della potenza scambiata tra la rete e il veicolo

Infatti se il valore della tensione della singola cella supera i 4,3 V si corre il rischio di sovraccaricarla. Tale situazione comporta la placcatura del litio nell'anodo e la liberazione di gas altamente infiammabili dal materiale catodico, con rischi di incendi ed esplosioni.

Il livello di tensione usato per caricare una batteria influisce molto anche sulla sua vita utile. Maggiore sarà la tensione a vuoto di una batteria carica e maggiore sarà la carica in essa accumulata, mentre minore sarà il suo ciclo di vita.

Per queste due importanti motivazioni, il sistema di monitoraggio e controllo della ricarica (BMS) presente all'interno del veicolo, non appena rileva dai sensori una tensione prossima al valore limite diminuisce quasi totalmente l'alimentazione.

La carica chiaramente non risulta ancora completata, gli intervalli perciò risultano necessari affinché la temperatura della batteria si abbassi, per evitare possibili sovraccarichi che la danneggerebbero (non deve superare i 60°C), e affinché il valore della tensione di ogni singola cella si riduca fino ad un valore tale per cui risulti possibile il proseguimento della ricarica.

La tensione diminuisce durante la pausa grazie al rilassamento delle cariche presenti negli accumulatori ma soprattutto grazie al bilanciamento effettuato dal sistema BMS. Infatti durante la ricarica i valori delle tensioni delle celle componenti i tre pacchi batteria possono variare in maniera disomogenea.

In questo modo la lettura della tensione nominale dell'intero pacco potrebbe non essere esatta e a causa di essa alcune celle potrebbero portarsi a valori della tensione non ammissibili, generando situazioni di pericolo.

Per evitare che ciò accada, il *BMS* deve equalizzare il valore delle tensioni di ogni singola cella prima di poter continuare la ricarica.

La dipendenza della pausa dal valore limite della tensione imposta ad ogni cella, viene confermata dallo svolgimento di due ricariche realizzate appositamente a tale scopo. La prima è effettuata a partire da un valore del SOC pari al 22,7% e la seconda a partire dal 25,4 %.

Le prove hanno evidenziato infatti che nell'ultimo caso la pausa inizia in anticipo rispetto al primo, ciò è motivato dal fatto che le celle vengono ricaricate a partire da un valore di tensione maggiore, raggiungendo di conseguenza prima il limite massimo. Ulteriore conferma deriva anche dalla seconda parte della ricarica che presenta all'incirca la stessa durata per entrambe, come ci si aspettava.



Figura 3-35 – Andamento della potenza nel tempo di due prove di carica

La Figura 3-36 di seguito mostra nel dettaglio che le potenze scambiate con la rete nelle due precedenti prove si mantiene su un medesimo valor medio.

L'oscillazione contenuta di quest'ultima nel tempo fa sì che l'energia ricevuta dalle batterie sia costante e che quindi la percentuale della loro capacità aumenti in maniera lineare.

Durante le pause ovviamente la percentuale di carica delle batterie si mantiene costante, confermando la precedente tesi.



Figura 3-36 - Dettaglio dell'andamento delle potenze di due prove di carica

Nella Figura 3-37 viene invece illustrato l'andamento del SOC insieme a quello della potenza.



Figura 3-37 - Andamento nel tempo della potenza e del B.P.R.L delle batterie

Dalla medesima illustrazione inoltre è possibile notare come l'inizio e la fine della procedura avviene rispettivamente a circa 20 e 80% del SOC. Questo comportamento è legato proprio alla natura delle batterie Li-ion, come evidenziato nella letteratura. Lo stato di carica delle batterie non deve mai arrivare al di sotto del 20% in quanto si correrebbe il rischio di portare la tensione di cella ad un valore limite di 2,5 V, al di

sotto del quale questa non può più essere ricaricata con i normali caricatori, risultando inservibili.

Per evitare invece rischi di sovraccarica il SOC non viene mai portato oltre il valore massimo dell'80%.

#### Influenza della tensione di rete

Per studiare l'influenza della tensione di alimentazione sulla ricarica, sono state effettuate due specifiche prove, nelle quali il valore della tensione è stato appositamente scelto differente. Per far ciò la prima ricarica è stata effettuata a Civitavecchia dove il valore oscillava intorno ai 230 V (probabilmente per la maggiore vicinanza agli impianti di produzione dell'energia elettrica), la seconda invece a Roma con una tensione di alimentazione pari a 215 V.

In entrambe le prove il veicolo presentava allo stato iniziale un SOC pari a 25,4%.

Ad una prima valutazione è sembrato scontato pensare che il veicolo, se sottoposto ad una tensione maggiore, completa la ricarica in un tempo minore, visto le maggiori potenze in gioco.

La misura delle correnti mediante strumentazione ha però mostrato un interessante andamento di quest'ultime. Infatti i valori registrati a Civitavecchia sono risultati minori rispetto a quelli di Roma, come testimonia Figura 3-38.

Il post-processamento dei dati ha di fatto mostrato che le potenze risultano essere circa le stesse e che quindi i valori dell'energie scambiate con la rete ed accumulate nelle batterie sono quasi uguali.

A Civitavecchia in circa 106 minuti di ricarica sono stati immagazzinati 3,674 kWh mentre a Roma in circa 104 minuti 3,679 kWh, con una differenza del tutto trascurabile di solo 0,005 kWh.



Figura 3-38 – Andamento dell'intensità di corrente in due prove di ricarica

Queste due prove hanno dimostrato che, indifferentemente dalla tensione di alimentazione, il sistema di monitoraggio e controllo della ricarica delle batterie impone e gestisce sempre un preciso flusso di energia tale da assicurare un adeguato livello di sicurezza e una ricarica nel minor tempo possibile.

#### Sintesi dei risultati ottenuti

In totale sono state effettuate 6 prove di carica completa; dall'elaborazione dei dati sono stati ottenuti i seguenti risultati, da intendersi in media.

SOC iniziale	Energia totale	Durata totale
%	kWh	min
24,33	3,7	106,28

Tabella 3-9 – Risultati dei principali parametri nell'analisi di carica completa

Tabella 3-10 – Risultati dei principali parametri nell'analisi di carica (pausa 1)

SOC Iniziale Pausa 1	Inizio Pausa 1	Durata Pausa 1
%	min	min
56,9	52,24	7,97

Tabella 3-11 – Risultati dei principali parametri nell'analisi di carica completa (pausa 2)

SOC Iniziale Pausa 2	Inizio Pausa 1	Durata Pausa 1
%	min	min
74,5	86,66	8,6

In media il veicolo inizia la ricarica con un SOC pari al 24,33%, l'energia totale al contatore è in media di 3,7 kWh e la durata totale è di più di 106 minuti. La prima pausa in media ha inizio dopo poco più di 52 minuti, quando lo stato di carica delle batterie è del 56,9%, e la sua durata è di circa 8 minuti. La seconda pausa invece comincia dopo quasi 87 minuti, quando il SOC ha raggiunto il livello pari al 74,5%, e dura più di 8 minuti.

La casa produttrice dichiara un consumo di energia per ricarica delle batterie pari a 3,56 kWh e una durata di 90 minuti.

La differenza maggiore si riscontra nel tempo, ciò viene giustificato dal fatto che non vengono prese in considerazione le due pause, le quali ricoprono in media più di 16

minuti. Sommando questo valore ai 90 minuti dichiarati ecco che si ritrova il valore ottenuto dall'analisi svolta, ovvero circa 106 minuti.



Figura 3-39 – Dettaglio della prima pausa in una prova di carica completa



Figura 3-40 – Dettaglio della seconda pausa in una prova di carica completa

## 3.3.5.3 Carica parziale

#### 3.3.5.4 Strumentazione di misura

La strumentazione si compone di:

• 1 PC portatile

- 1 interfaccia hardware ed un cavo di connessione tra il PC e la ECU
- 1 software

Come nella prova precedente l'interfaccia hardware è il dispositivo ELM327 ed il software selezionato è Scanmaster-ELM.

# 3.3.5.5 Modalità di svolgimento dell'analisi

Prima fase della prova consiste nel mettere in carica il veicolo e cronometrare il tempo stabilito. Una volta terminata la ricarica viene collegato l'ELM327 alla presa OBDII ed al pc, e si lancia il programma Scanmaster.

Il software viene utilizzato per acquisire i parametri necessari al calcolo dei km percorsi realmente in elettrico.

Le grandezza necessarie sono due:

- Velocità del veicolo, espressa in [km/h]
- Giri del motore a combustione, espressi in [rpm]

La velocità occorre a determinare la lunghezza dello spostamento, gli rpm per identificare l'istante in cui si è passati in modalità ibrida con l'accensione del motore. Quest'ultimo aspetto è essenziale per scartare la parte di percorso in modalità di ibrido.

Per ottenerli è possibile connettersi, una volta apparsa la finestra che mostra le centraline rilevate dal programma, indifferentemente alla ECU1, ECU3 o alla ECU4 e selezionare i PIDs numero 0D, Velocità veicolo [km/h] e 0C, Giri del motore [rpm].

La prova termina quando sul display del veicolo viene segnalato il passaggio dalla modalità elettrica (EV) alla modalità ibrida (HV), ovvero quando è terminata l'energia elettrica accumulata nelle batterie nella ricarica svolta.

I dati così acquisiti dal software vengono salvati su file di testo e post-processati mediante un programma di calcolo numerico.

Tale programma è stato strutturato in maniera tale da eseguire le seguenti operazioni:

- Formattazione del tempo fornito in hh:mm:ss nella forma in secondi
- Allineamento temporale dei due parametri, essendo acquisiti con tempi di campionamento differenti
- Eliminazione dei dati in cui compaiono rpm maggiori di zero
- Metodo delle parabole come integrazione numerica da applicare per determinare il valore dei km percorsi

## Valutazione dei risultati

La Tabella 4-7 riassume i risultati ottenuti nella prova. In essa sono riportati i km dichiarati dal veicolo, i km effettivamente percorsi su strada, la differenza tra i km reali e quelli teorici, il peso percentuale di tale variazione ed infine i kWh immagazzinati nella batteria.

Durata [min]	Km teorici [km]	km reali [km]	ΔKm [km]	∆km% [%]	Energia [kWh]
0	0	0	0	0	0
10	1,8	0,84	0,96	53 <i>,</i> 08	0,42
15	3,9	2,22	1,68	43,08	0,64
20	5,3	3,39	1,95	36,53	0,85
25	6,2	4,13	2,07	32,86	1,07
30	8,0	5,73	2,27	27,68	1,29
45	11,8	9,10	2,67	22,66	1,90
60	14,8	11,60	3,22	21,72	2,20
75	18,2	14,42	3,78	20,78	2,74
90	20,0	15,86	4,14	20,69	3,06
106	21,4	17,10	4,30	20,09	3,70

Tabella 3-12 – Risultati della prova di carica parziale

Tabella 3-13 - Risulta	iti della prova	di carica parziale
------------------------	-----------------	--------------------

L'andamento dei kWh viene rappresentato in Figura 3-41. La relazione tra energia e tempo è lineare, come confermato dal grado di correlazione.



Figura 3-41 – Andamento nel tempo dell'energia immagazzinata nelle batterie

La non perfetta linearità è giustificata dalla presenza delle due pause che, come si può notare, sono collocate intorno i 55 e gli 85 minuti.

All'aumentare dell'energia accumulata nelle batterie, i chilometri teoricamente sfruttabili in solo elettrico crescono secondo la Figura 3-42.



Figura 3-42 – Andamento nel tempo dei chilometri teorici

Le prove su strada hanno permesso invece di definire i chilometri corrispondenti realmente percorsi (Figura 3-43).



Figura 3-43 – Andamento nel tempo dei chilometri reali

Questi valori mostrano di fatto la notevole influenza del ciclo reale sui consumi del veicolo, in questo caso solamente elettrici. Infatti in media si è calcolato una riduzione della lunghezza percorsa pari a circa il 30%.



Figura 3-44 – Confronto in funzione del tempo di carica dei chilometri teorici e reali

All'aumentare della durata della ricarica diminuisce in percentuale la differenza fra i chilometri teoricamente effettuabili e quelli realmente percorsi sul ciclo.



Figura 3-45 – Differenza chilometrica percentuale tra i chilometri teorici e quelli reali in funzione della durata di carica

Infatti con ricariche di breve durata si ha una riduzione che va dal 53 al 27% mentre con ricariche considerate di lunga durata, questa differenza si appiattisce sempre di più fino ad assestarsi su un valore all'incirca pari al 20%.

Questo comportamento si ritiene legato al mancato rilassamento delle cariche all'interno delle batterie e alla disomogeneità con cui ogni singola cella si ricarica; ciò comporta che quando si effettua una rapida ricarica la centralina del veicolo rileva un valore della tensione ai capi della batteria maggiore di quella reale.

Questo fenomeno si risente sempre meno all'aumentare della durata della ricarica grazie soprattutto alle due pause, che permettono, attraverso il BMS, di effettuare il corretto bilanciamento.

# 3.3.5.6 Calcolo del rendimento di carica

Dai risultati ottenuti nella prova di carica completa è stato determinato che in media il veicolo inizia la ricarica quando il SOC è pari al 24,33% e l'energia totale consumata è di 3,7 kWh.

La batteria viene ricaricata fino all'80% del SOC ed essendo 5,2 kWh la capacità totale delle batterie, l'energia accumulata risulta essere pari a 4.16 kWh.

Secondo l'analisi svolta, la ricarica comincia da un valore medio del SOC pari a 24.33%, ne segue che l'energia immagazzinata durante una ricarica è di 2,89 kWh. Poiché in media risultano consumati 3,7 kWh di energia elettrica, risulta evidente la presenza di perdite durante la procedura.

Tali irreversibilità sono dovute al sistema di ricarica stesso ed in particolare ai principali dispositivi che lo compongono:

- 1 inverter per la conversione della corrente continua in alternata
- 1 converter per la trasformazione dei valori di tensione applicata alle batterie
- 3 pacchi batterie

I tre componenti citati sono caratterizzati da uno specifico rendimento, le stesse batterie agli ioni di litio hanno una efficienza detta amperometrica.

Dai calcoli si ottiene un valore del rendimento globale del sistema di ricarica poco superiore al 78%. Tale numero risulta attendibile se si pensa che, considerando per ciascun componente un rendimento almeno pari al 90%, si ottiene un rendimento globale del 73%.

SOC 80% [kWh]	4,16
SOC 24.33% [kWh]	1,27
Energia da ricaricare [kWh]	2,89
Energia al contatore [kWh]	3,70
Energia perduta [kWh]	0,81
Rendimento globale [%]	78,24

Tabella 3-14 – Calcolo del rendimento di carica

# 3.3.6 Analisi delle emissioni di particolato

## 3.3.6.1 Obiettivi dello studio

Lo scopo di questa analisi è quello di qualificare e quantificare le emissioni del veicolo in prova, nelle reali condizioni di utilizzo.

Lo studio si è concentrato esclusivamente sulle emissioni di particolato.

La ragione risiede nel fatto che il veicolo è un'autovettura finalizzata all'utilizzo cittadino ed il particolato è considerato l'inquinante di maggiore impatto nelle aree urbane, tanto da indurre le autorità competenti a disporre dei blocchi del traffico per ridurne il fenomeno.

Il particolato oltre a produrre annerimento degli edifici e riduzione della visibilità, è estremamente pericoloso per la salute dell'uomo, è stata infatti ormai accertata in molte ricerche la stretta relazione tra inquinamento ambientale da particolato carbonioso e morti per cancro.

I veicoli che montano motori diesel sono i principali responsabili di tali emissioni, ma il particolato può derivare anche da motori a benzina ad iniezione diretta [18].

Non a caso nella attuale normativa Euro 5, a differenza della precedente, sono stati imposti dei limiti sul particolato anche per i suddetti veicoli (5 mg/km).

La quantificazione di tale agente inquinante non è l'unico obiettivo dello studio, in particolare si vuole dimostrare come le continue accensioni del motore termico in supporto dei propulsori elettrici durante la modalità EV causino una maggiore emissione di particolato rispetto al caso di funzionamento da ibrido.

L'ipotesi è giustificata dal comportamento dell'autovettura durante la fase di warm-up del motore e del catalizzatore, in cui le emissioni sono maggiori.

Il warm-up della vettura rappresenta il riscaldamento del motore e del catalizzatore, successivo ad un avvio a freddo, fino al raggiungimento della normale temperatura di esercizio. Durante questo transitorio i consumi e le emissioni sono elevate sia perchè il catalizzatore non è in temperatura ottimale di lavoro e non converte i gas combusti in gas meno inquinanti e sia perchè il motore a combustione utilizza una miscela ricca in modo da innalzare la temperatura dei gas di scarico, velocizzando così il warm-up del catalizzatore stesso.

Nella marcia in solo elettrico il motore a combustione si accende a freddo, ad una condizione di lavoro lontana da quella ideale.

Per verificare tale tesi vengono effettuate due prove identiche, una però con le batterie completamente scariche (HV) e l'altra cariche (EV). In entrambe il veicolo è impostato su una modalità di guida POWER.

# 3.3.6.2 Strumentazione di misura

La strumentazione di misura è composta da due apparati principali. Il primo ha come fine quello di acquisire la portata dei gas di scarico ed i chilometri percorsi durante la prova. Il secondo di rilevare la parte carboniosa del particolato (PM), definita soot, attraverso la quale si risale al valore del particolato emesso. La catena di misura completa è costituita dai seguenti componenti:

- 1 Pc portatile
- 2 Software
- 1 Dispositivo di misurazione del soot
- 1 Batteria
- 1 Inverter

1 interfaccia hardware ed un cavo di connessione tra il PC e la ECU

Il sistema di misura della concentrazione volumica della parte carboniosa del particolato presente nei gas di scarico impiegato è l'AVL 483 Micro Soot Sensor.

Il pc portatile si collega sia alla strumentazione di bordo, tramite l'interfaccia hardware *ELM327*, e sia all' AVL Micro Soot Sensor, attraverso un cavo ethernet.

I software installati sono due:

- Scanmaster-ELM
- AVL Device Control

Il primo comunica, come noto, con le centraline del veicolo, il secondo invece consente l'interfacciamento con il dispositivo di misurazione del soot.

# 3.3.6.3 Modalità di svolgimento della prova

La prima parte della prova si caratterizza dall'installazione di tutti i componenti connessi con il dispositivo AVL.

Conclusi i collegamenti, una volta acceso il dispositivo AVL, viene avviata la procedura di connessione del pc allo strumento. L'interfacciamento avviene configurando prima la scheda di rete del pc, impostando un IP address della Vlan specificata sull'AVL, e poi inserendo sul browser l'IP address specifico dell'apparecchio.

Al termine dell'operazione viene visualizzata la home page del programma AVL Device Control, illustrata nella Figura 3-46.

Il software risulta necessario non solo per l'acquisizione ma anche per la regolazione del funzionamento dell'apparecchiatura stessa.

Prima di iniziare la prova infatti il dispositivo deve effettuare una fase di avvio e calibrazione della durata di 25 minuti. Tale operazione viene avviata proprio attraverso il comando *Pause* presente nel programma.

Completata la preparazione di tutta la strumentazione AVL viene effettuato, mediante l'ELM327, il collegamento dello stesso pc alla presa diagnostica OBDII. Il software Scanmaster occorre per determinare i chilometri percorsi durante la prova e le portata dei gas allo scarico. La centralina a cui connettersi è la ECU1 ed i rispettivi PIDs da selezionare sono i numeri 0D, Velocità veicolo [km/h] e10, Portata d'aria [g/s].

Device State		Sleen	1	Status		Poart/		Lise	er Level	Permete cont	rol			
cro Soot Sepsor	Online s	dew.	~		. ID. 12		a 0	72		rtemote com	101			
	Of line v	1011		•		•		9	<b></b>			_		
	к 🖭 и 🏟	@ ∰												-
oncentration sensor   0.0	mg/m3j											Con	centration sensor	E
200 - Million Do														mg/n
												Con	centration dil. corre	ected R
7.525_														
														mg/m
E 0E												Peal	k concentration sen	isor 🔂
5.05 _														
														mg/m
2.575												Peal	k concentration dil.	corrected
8														mg/m
.1 J <u> </u>		2	5.0			50.0				75.0	100.0		N.	
	-					Time[s	.]	- 11		arean.			Start	Stop
leas, cell temp,	3	Gas temper	ature	Ø	TE co	oler humidit;	/ (	3	Flow	3	Relative pressure	G	Dilution ratio	6
2	6.4			26.3			1	9		0.63		-8.3		1.00
/	°C	×		°C	×		%rel.	Hi o	×	l/min.	1	mbar	1	
Sleep				Pause				Stand	Бу		Measurement		Zero check	¢
Time 🔺		Device		1	Message									

Figura 3-46 - Home page del software AVL Device Control

La prova viene eseguita sul ciclo definito nell'analisi dei consumi ed il numero delle ripetizioni sono due e non cinque, a causa della scarsa capacità della batteria che alimenta la strumentazione AVL. Al termine della prova i dati acquisiti dai due software vengono salvati su file di testo e post-processati mediante un programma di calcolo numerico.

Tale programma è strutturato in maniera tale da eseguire le seguenti operazioni:

- Formattazione del tempo fornito in hh:mm:ss nella forma in secondi
- Allineamento temporale dei parametri
- Metodo delle parabole come integrazione numerica da applicare per determinare il valore dei chilometri percorsi
- Allineamento temporale della portata d'aria [g/s] con la concentrazione di soot [mg/m<sup>3</sup>]
- Calcolo della portata d'aria volumetrica [m<sup>3</sup>/s] attraverso il rapporto della portata d'aria con la sua densità, pari a 1225 [g/m<sup>3</sup>] in condizioni standard
- Prodotto della portata d'aria volumetrica [m3/s] con la concentrazione di soot [mg/m<sup>3</sup>] al fine di ottenere la portata di soot [mg/s]
- Metodo delle parabole come integrazione numerica della portata di soot per determinare la sua quantità [mg] emessa nella prova.
- Rapporto della quantità di soot [mg] con i chilometri percorsi per calcolare il valore delle emissioni del veicolo [mg/km]

## 3.3.6.4 Valutazione dei risultati

I risultati hanno evidenziato che il picco di concentrazione della parte carboniosa del particolato corrisponde all'accensione del motore termico, come si può notare dalla Figura 3-47.



Figura 3-47 – Corrispondenza concentrazione di soot con l'accensione del motore termico

Nella prova con le batterie completamente cariche si sono riscontrati un numero inferiore di picchi di concentrazione di soot, dovuto ad un minore utilizzo del motore termico, ma ad un livello notevolmente maggiore. Nel funzionamento da ibrido invece si è registrata una continua emissione di soot ma ad un livello molto ridotto.

Il warm-up di conseguenza ha un'influenza dominante su tale comportamento, il motore a combustione nella fase di elettrico si trova sempre in wam-up, lontano dalle condizioni ottimali di lavoro che ne pregiudicano sia i consumi che le emissioni. In modalità HV, al contrario, le condizioni sono ottimali e consentono di ottenere emissioni di soot fortemente limitate.

Il picco maggiore si è ovviamente registrato in corrispondenza alla prima accensione del motore a combustione.



Figura 3-48 – Andamento della concentrazione di soot e del quantitativo emesso in funzione del tempo in modalità EV



Figura 3-49 – Andamento della concentrazione di soot e del quantitativo emesso in funzione del tempo in modalità HV

La quantità di soot emesso dal veicolo nelle due prove ha evidenziato che in modalità di solo elettrico, se la richiesta di potenza è tale da far intervenire il motore termico, il valore di soot prodotto risulta essere addirittura di un ordine di grandezza superiore, come mostrato nella Tabella 3-15.



#### Tabella 3-15 – Quantitativo di soot emesso in modalità EV e HV

Risulta di conseguenza dimostrata la teoria ipotizzata all'inizio, ovvero che le accensioni del motore termico in supporto dei propulsori elettrici durante la modalità EV causano una maggiore emissione di particolato rispetto al caso di funzionamento da ibrido.

La strumentazione AVL 483 Micro Soot Sensor a disposizione è in grado di rilevare solo la concentrazione di soot presente nei gas esausti. Essendo la frazione carboniosa (soot) solo uno dei componenti del particolato, si è utilizzato un modello fisico-matematico per ricavare le quantità delle altre frazioni [19-20].

Nella prova viene emesso un quantitativo di soot pari a 2,86 [mg/km]; utilizzando il modello descritto nel paragrafo 2.5.3 viene ricavato il valore del particolato emesso, pari a 3,37 [mg/km].

Il valore di emissione di PM della prova rientra nel limite imposto dalla normativa attuale EURO 5, pari a 5 [mg/km], ciò nonostante il dato ottenuto risulta preoccupante soprattutto in vista della futura normativa EURO 6, prevista per il 2014, in cui l'Unione europea vuole rafforzare i limiti delle emissioni inquinanti, in particolare per quanto riguarda il particolato, con l'intenzione di dimezzarli.

In questo modo il valore di 2,5 [mg/km] come valore massimo consentito non risulterebbe rispettato dal veicolo e la casa produttrice dovrebbe quindi tenerne conto.



Figura 3-50 – Emissioni di PM del veicolo Plug-in rispetto alle normative EURO 5 e EURO 6

# 3.4 Analisi delle prestazioni energetiche di un mini-bus ibrido alimentato ad idrogeno

# 3.4.1 Descrizione e metodologia utilizzata

In questa sezione viene descritta l'esperienza effettuata con un mini-bus ibrido alimentato ad idrogeno. Nell'ambito di questa attività è stata studiata l'efficienza energetica ed i consumi di un mini-bus è attualmente utilizzata da alcune municipalità in Italia, Francia, Portogallo e Gran Bretagna. Nella Tabella 3-16 vengono riassunte le caratteristiche principali del powertrain.

Energy storage	Nickel-Cadmic Batteries, 72 V, 125 Ah
Vehicle speed	30 km/h
Max Power	27 kW
Electric engine	25 kW, 72 V, 235 Nm
Bus weight	6000 kg

Tabella	3-16 -	Caratteristiche	del	powertrain
rabena	2-10	Caracteristiche	uei	powertram

I test sono stati condotti in condizioni reali, utilizzando dei percorsi urbani e facendo varie sperimentazioni variando il numero dei passeggeri, e quindi il carico [25]. Il percorso di riferimento considerato collega il porto turistico di Civitavecchia al centro della città, come mostrato nella Figura 3-51. La distanza coperta è pari a circa 1.6 km. La sperimentazione è stata effettuata in modo tale da valutare il comportamento energetico del mini-bus nelle stesse condizioni in cui dovrebbe svolgere le sue funzioni.

Il percorso è stato diviso in quattro parti in modo tale da evidenziare il comportamento del mini-bus in differenti tratti stradali con pendenze differenti. A-B, B-C, C-B e B-A. Il tratto da A a B ha una pendenza del 20%, mentre il tratto tra B e C è pianeggiante.

Il sistema di acquisizione, usato per il monitoraggio delle performance del mini-bus, è stato scelto sulla base delle sue caratteristiche e dell'elettronica già presente a bordo. La strumentazione consiste in tre Field Point della National Instruments, una USB-CAN peak port e un collegamento seriale. I tre field point sono stati connessi ad un PC per acquisire le tensioni e le correnti direttamente dal pacco batterie e dalla batteria degli ausiliari.

La tensione della batteria è stata splittata, con un partitore costruito ad hoc, in modo tale da estrapolare solamente una frazione della tensione, in modo tale da adattarla al range di acquisizione del field point (0-10 V). La frequenza di acquisizione è stata settata a 100 ms. La velocità del mini-bus, la tensione del motore e la sua corrente sono state acquisite attraverso un software proprietario fornito dal costruttore, connesso attraverso una porta seriale. Le misure effettuate tramite i field point e la CAN sono state acquisite attraverso un programma Labview e successivamente post-processate.



Figura 3-51 – Percorso sul quale sono stati effettuati I test

Le batterie sono state ricaricate prima di effettuare ogni test in modo tale da creare sempre le stesse condizioni operative. I test sono stati effettuati con un numero di passeggeri vatiabili (3, 5, 7, 10 e 15 passeggeri) e sono state valutate le performance per ogni singolo caso.

Per completare l'analisi, è stata monitorata e valutata l'efficienza del sistema di ricarica. I risultati finali sono stati analizzati in modo tale da calcolare il costo totale dell'energia consumata per km,

# 3.4.2 Risultati

Attraverso i dati acquisiti attraverso la strumentazione sono stati calcolati i seguenti parametri:

- Consumo per km
- Potenza media alle ruote in funzione del numero dei passeggeri
- Energia recuperata in fase di frenata e in funzione del numero dei passeggeri
- Rendimento globale

Nella Figura 3-52 sono stati riportati i risultati di un test. Il grafico si riferisce ad un test compiuto sul percorso indicato precedentemente con 10 passeggeri a bordo. La massima corrente in uscita dalle batterie è circa 510 A che significa una velocità di scarica pari ad un C-rate 4. Questo valore di corrente è così elevato quando il mini-bus accelera repentinamente o quando deve superare una salita molto ripida, come in questo caso.. Nella modalità di recupero in frenata, 50 A è la corrente massima fornita alle batterie. Come evidenziato nel grafico, il recupero di energia avviene durante la discesa, quando la corrente è negativa.

Nel momento in cui viene richiesta una corrente così elevata, la tensione di ogni cella potrebbe diminuire la tensione fino ad 1 Volt. Di conseguenza, le batterie sono molto stressate quando lavorano in condizioni così dinamiche. Inoltre, il consumo medio è stato calcolato per un ciclo urbano nel percorso considerato in Civitavecchia città.



Figura 3-52 – Profilo di corrente e di tensione durante una generica prova.

Nella Figura 3-53, viene raffigurata la potenza elettrica in uscita dalla batteria in funzione del tempo. In questo caso il consumo totale di energia è stato di 1,69 kWh per una media di 0,53 kWh/km.

Il grafico in Figura 3-54 riassume i risultati per ogni test effettuato. In particolare viene raffigurata l'energia specifica di trazione rispetto al numero di persone trasportate. Analizzando le prove effettuate, il consumo energetico specifico varia da 0,47 kWh/km a 0,55 kWh/km linearmente con il carico.



Figura 3-53 – Andamento della potenza elettrica per una prova con 10 persone a bordo



Figura 3-54 – Energia consumata in funzione del numero della massa dei passeggeri

La potenza media alle ruote dei mini-bus è stata calcolata per carichi diversi per valutare la loro correlazione. La potenza media è tra 6,6 kW e 8,7 kW come visualizzato

in Figura 3-55. La capacità delle batterie è di circa 9 kWh. Pertanto, l'autonomia può variare da 1 ora ad 1 ora e 20 minuti in funzione del numero dei passeggeri.

Poiché la velocità media è stata valutata circa 10 km/h, l'autonomia è da considerarsi mediamente tra 10 km e 13 km.-



Figura 3-55 – Potenza alle ruote in funzione della massa dei passeggeri

Confrontando la Figura 3-52 e la Figura 3-56, è stato rilevato come la corrente sia molto elevata in corrispondenza del tratto in cui si riscontra una elevata accelerazione del bus. Analizzando la velocità nella Figura 3-56, il profilo di velocità è speculare rispettivamente nel tratto AB-BA e BC-CB, ma la batteria fornisce correnti maggiori nel tratto di risalita come mostrato nelle Figura 3-52. Nel percorso pianeggiante, la corrente della batteria è vicina alla corrente nominale (C-rate 1).

Inoltre, considerando i dati acquisiti, è stato calcolato l'indicatore rendimento globale, definito nel paragrafo 3.2.

Power max [kW]	29.3	
P in [kW]	0.12	4 %
P tyre [kW]	2.64	90 %
P aero [kW]	0.17	6 %
Average Power [kW]	2.94	100 %

Tabella 3-17 – Ripartizione della potenza alle ruote nelle varie componenti



Figura 3-56 – Ciclo di marcia acquisito durante uno dei test

Una volta ottenuta la potenza alle ruote del veicolo in funzione del tempo, sono state effettuate le seguenti considerazioni (Tabella 3-17):

- 1. L'attrito riduce l'efficienza globale in modo significativo risultando pari al 90% del fabbisogno energetico totale
- 2. L'energia persa negli attriti aerodinamici è pari a circa il 6% del fabbisogno totale di energia
- 3. L'energia dovuta a vincere l' inerzia è pari a circa il 4% del fabbisogno totale di energia;
- 4. Il rendimento globale è del 60%.

Pertanto, il 94% del fabbisogno energetico è direttamente collegato alla massa, ed è in accordo con i dati sperimentali sul consumo di energia, come riportato in Figura 3-54. L'energia frenante recuperata aumenta proporzionalmente al peso totale, come riportato in Figura 3-58.

Analizzando il grafico, il recupero di energia in frenata è molto limitato, infatti durante il giro di riferimento il valore è pari mediamente a 0.012 kWh Tuttavia, confrontato con l'energia inerziale effettivamente disponibile, l'energia recuperata è pari al 50%. Chiaramente essa migliora proporzionalmente al numero dei passeggeri

Per completare l'analisi, è stata valutata la fase di ricarica del mini-bus dal punto di vista energetico. Sono state acquisiti gli andamenti delle correnti e delle tensioni in ingresso alla batteria.



Figura 3-57 – Percentuale di energia recuperate (componente inerziale) in funzione della massa dei passeggeri

Analizzando gli andamenti in funzione del tempo, riportati in Figura 3-58, si può notare come profilo di ricarica è stata impostato in modo tale da ottimizzare il trasferimento di energia e preservare lo SOH delle batterie. Le batterie, infatti, vengono caricate state caricate ia C-rate compresi tra 1/3 e 1/6 con una correnti quindi molto bassa.



Figura 3-58 – Andamento della corrente in ingresso alle batterie durante la fase di ricarica
Considerando che il consumo di energia può variare da 0,47 kWh/km a 0,55 kWh/km e che l'efficienza di ricarica è pari al 90%, è possibile calcolare l'energia corrispondente assorbita dalla rete e il costo di esercizio totale per ogni km . Considerando un valore medio di riferimento, l'energia richiesta dalla rete sarebbe pari a circa 0,59 kWh/km. Considerando il prezzo dell'energia pari a 0,15 €/kWh, il costo energetico per chilometro del min-ibus può essere valutato pari a 0,08 €/km.

# 3.5 Analisi preliminare delle prestazioni di un veicolo elettrico alimentato a batterie

# 3.5.1 Metodologia di lavoro (guidatori, percorsi effettuati – urbano ed extraurbano

Le prove sono state svolte a Roma. Il veicolo è stato guidato da 4 differenti guidatori (3 uomini ed una donna). E' stato definito un percorso variegato composto da tratti urbani ed extraurbani (Figura 3-60) che potesse simulare l'utilizzo del veicolo in ogni tipologia di situazione stradale. Ad esempio il percorso effettuato il 22 luglio 2010 (Figura 3-59) è composto di un tratto urbano (Via Appia Nuova, Via Cristoforo Colombo) e un tratto extraurbano (Grande Raccordo Anulare).

100% 💽 G. map  $| \uparrow \rangle$ . Colli 4  $\downarrow$ Municipio III dell'Aniene Vills Borg Città del Portonaccio + Vaticano Campo Marzio Roma Tor Tre Teste SP49a Municipio VI Trastevere Centocell Villa Doria Torre Maura E80 ianico Garbatell Giardinetti -Cinecittà Università degl Studi di Roma Corviale Tor Vergata La Romanina Trullo Osteria del Curato Europa L'Annunziatella Tor di A90 Mezzavia R FI /igna Gregna Murata SP3c Sant'Andrea Torricola S. 7 Cecchignola SS 48 Mo Vallebuor Torrino SS 48 Ciampino Ro Cia Spinaceto Valleranello Castel di Leva SP3o Center: 41.84936,12.51549

Le prove sono state svolte sempre con almeno due persone a bordo.

Figura 3-59 – Percorso effettuato (23 giugno 2010)



Figura 3-60 – Ripartizione del percorso effettuato (23 Giugno 2010)

# 3.5.2 Strumentazione utilizzata e grandezze acquisite

Durante le prove svolte dal, sono state acquisite le seguenti grandezze in condizioni reali: tensione di batteria, corrente di batteria, temperatura del DC/DC converter, temperatura del motore elettrico, e delle batterie di potenza (esterna dell'involucro). Questo è stato possibile grazie alla strumentazione installata sul veicolo durante le prove effettuate, in particolare il Field Point della National Instrument collegato al computer per quel che riguarda l'hardware e un programma di acquisizione in LabVIEW per quel che riguarda il software.

Inoltre, è stato possibile contemporaneamente registrare velocità, dislivello e percorso effettuato grazie al GPS, collegato anch'esso al computer, e al software di acquisizione.



Figura 3-61 – Datasheet della pinza amperometrica FLUKE 90i-610s usata per misurare le correnti

# 3.5.3 Risultati preliminari ottenuti

In Tabella 3-18 sono mostrati i risultati preliminari ottenuti dalla sperimentazione.

Autonomia reale	80 km circa	
Tempo di ricarica	367 minuti (6 h e 7 minuti)	
Massima velocità	128 km/h	
0 – 100 km/h	15,2 s	
Max pendenza testata	35%	

Tabella 3-18 – Risultati preliminari ottenuti

# 3.5.4 Problemi riscontrati e possibili soluzioni

Il problema più rilevante che è stato riscontrato nel funzionamento del veicolo riguarda la batteria degli ausiliari. Nel momento in cui la macchina è stata rilevata, si è verificato un problema nell'accensione del veicolo dovuta al fatto che la batteria degli ausiliari a 12 V era scarica.

Quando questo avviene, nonostante le batterie di potenza siano completamente cariche, non è possibile far partire la macchina in nessun modo se non caricando la batteria stessa con un alimentatore esterno. Lo stesso problema si è verificato il giorno successivo, dopo aver percorso 38 km, distribuiti tra strade urbane e interurbane. Dopo aver utilizzato l'auto per un maggior numero di chilometri, questo inconveniente non si è più presentato. In ogni caso, rimane il problema che nel momento in cui si aprono le portiere della macchina, gli ausiliari cominciano ad assorbire energia dalla batteria a 12 V, mentre il collegamento con le batterie di potenza rimane aperto, non consentendo alla batteria a 12 V di ricaricarsi. Una possibile soluzione può essere quella di creare un collegamento elettrico tra le batterie di potenza e le batterie degli ausiliari controllato opportunamente in modo che se le prime sono cariche, lo siano sicuramente anche le seconde in modo che l'auto possa 'accendersi' e partire.

Per quel che riguarda le prestazioni e il comfort di guida della macchina, non si sono riscontrati particolari anomalie o inconvenienti rispetto alle auto della stessa categoria. Inoltre, le batterie hanno mantenuto sempre una temperatura altamente al di sotto della temperatura massima di sicurezza. Rimane comunque un problema nell'autonomia del veicolo, che risulta essere inferiore ai 100 km nei cicli reali di marcia.

Questa caratteristica, seppur attesa, merita senza dubbio di essere maggiormente approfondita, in quanto si riferisce alle prove effettuate in pochi giorni e su un

percorso variegato, ma non necessariamente rappresentativo di uno spostamento medio urbano.

# 4 Elementi innovativi per la progettazione di powertrain e analisi delle tecnologie esistenti

# 4.1 Dimensionamento di un power train innovative di un veicolo alimentato ad idrogeno

# 4.1.1 Obiettivi

Lo scopo principale di questa sezione è quello di dimensionare i componenti principali del powertrain di una city-car a fuel cell, che dovrebbe avere prestazioni e caratteristiche uguali o superiori rispetto ad un veicolo convenzionale [21].

Tale processo è stato effettuato attraverso la tecnica di reverse engineering. I reali fabbisogni, infatti, sono stati calcolati a partire da cicli di guida reali ottenuti nel corso di una campagna di acquisizione dati effettuata all'interno della città di Roma.

Nella Tabella 4-1 sono mostrati i requisiti iniziali considerati come dati di ingresso per la progettazione.





# 4.1.2 Powertrain ottimale del veicolo

In Figura 4-1 viene mostrato un ciclo di marcia di riferimento che rappresenta il comportamento di un veicolo (e di un guidatore) in una zona urbana. Questo ciclo è stato sintetizzato per la città di Roma e rappresenta un ciclo medio a cui si può fare riferimento per il nostro scopo [5] [26]. In realtà è importante specificare un ciclo di marcia dipende da molti fattori stocastici come: l'umore del conducente, le condizioni di guida e del traffico e che quindi sarebbe errato considerare un qualsiasi ciclo di marcia come rappresentativo di tutte le situazioni potenzialmente verificabili.

Chiaramente alcuni fattori sono evidenti e risultano cruciali, come ad esempio le continue inversioni di accelerazione di un ciclo reale su un veicolo elettrico che hanno come effetto negativo lo stress continuo delle batterie attraverso dei micro cicli. Ne consegue che i supercondensatori, possano essere una delle tecnologie di accumulo più promettenti proprio per aumentare i cicli di vita delle batterie.

Infatti, è stato dimostrato che, per veicoli elettrici alimentati da fuel cell, i supercondensatori siano in grado di fornire potenza in maniera istantanea e sono quindi in grado di alleviare le problematiche dovute ai tempi di risposta delle celle a combustibile. In altre parole, i supercondensatori offrono un alto rendimento energetico di accumulo ad elevatissima reattività [7].

In Figura 4-2 viene mostrato il layout del powertrain scelto in funzione delle considerazioni appena fatte. Le celle a combustibile alimentano i motori elettrici. Quando i motori elettrici richiedono correnti positive o negative improvvise, i supercondensatori intervengono fornendo o accumulando energia in maniera molto efficiente. I flussi energetici sono gestiti da un power controller progettato per ottimizzare il sistema.



Figura 4-1 – Ciclo di marcia reale utilizzato



Figura 4-2 – Powertrain del veicolo

# 4.1.3 Analisi dei fabbisogni

Come detto in precedenza, per la progettazione e il dimensionamento dei componenti è stata utilizzata una tecnica di reverse engineering partendo quindi dai fabbisogni reali di un potenziale guidatore calcolati su un ciclo di marcia reale. I parametri indicati in Tabella 4-2 sono stati calcolati seguendo la procedura indicata nel paragrafo 3.2.

Average power [kW]	5.98
Max braking energy [Wh]	26.4
Max energy in acceleration [Wh]	55.6
Max dP/dT [kW/s]	15
Total energy spent [Wh]	573.4
Distance [km]	4.4
Total energy spent per km [kWh/km]	0.13

Tabella 4-2 – Parametri energetici calcolati

#### 4.1.4 Dimensionamento dei supercondensatori

Al fine di dimensionare opportunamente i supercondensatori, è stata considerata, sul ciclo di marcia di riferimento, la massima energia alle ruote potenzialmente recuperabile in una frenata. L'efficienza di carica e di scarica del supercondensatore è stata considerata pari a 0,9. L'efficienza del convertitore è sta posta pari a 1 in maniera conservativa.

$$Wh UC = \frac{Max \ braking \ energy}{\eta_{UC_{charge}} \eta_{UC_{discharge}}} = 32.6 \ Wh$$

Considerando il risultato ottenuto il modulo base scelto è stato il seguente: Maxwell BMOD0058 (Tabella 4-3).

BMOD0058 E015 B01		
Capacitance [F]	58	
Rated Voltage [V]	15	
Maximum Operating voltage [V]	15	
ESR, DC [mohm]	19	
ESR 1 kHz [mohm]	10	
lc [mA]	1	
Max peak current 1 sec [A]	80	
Max continous current [A]	20	
Weight [kg]	0.68	
Energy available [Wh]	1.82	
E max [Wh/kg]	2.67	
P max [W/kg]	8.2	

Tabella 4-3 – Dati di targa del supercondensatori

$$N \text{ modules } = \frac{Wh UC}{Energy available per module} \cong 18$$

Il numero dei moduli da considerare, quindi è pari a 18.

#### 4.1.5 Dimensionamento delle fuel cell

Per il dimensionamento dei componenti, è importante tenere in considerazione quanto velocemente la richiesta di potenza massima viene raggiunta. Pertanto è necessario calcolare, in funzione del tempo, la variazione della richiesta di potenza alle ruote. Più precisamente, secondo il ciclo di marcia scelto e considerando la variazione di potenza nel tempo, sembra essere non conveniente scegliere il massimo valore di dP/dt, perché il picco più alto sembra essere un valore isolato in realtà non necessario al conducente. Il valore scelto è quindi pari a 15 kW/s.



Figura 4-3 – Variazione istantanea di Potenza in funzione del tempo

La seguente relazione deve essere sempre positiva in modo tale da verificare il corretto dimensionamento:

$$dP/dt_{cycle} \leq dP/dt_{UC} + dP/dt_{FC}$$

questo significa che la variazione di potenza richiesta del ciclo nell'unità di tempo deve essere minore alla somma delle componenti fornite dalle celle a combustibile e dai supercondensatori.

Relativamente ai supercondensatori, essi hanno una tensione nominale per modulo di 15 V e una corrente massima di picco (1 sec) pari a 80 A. Essendo stati scelti 19 moduli:

 $dP/dt_{UC} = Rated \ voltage \ \cdot \ Max \ peak \ current \ (1 \ s) \ \cdot \ N \ mod = 22.8 \ kW$ 

Da tale risultato ne consegue che, poiché la relazione precedente è verificata senza considerare il contributo della componente  $dP/dt_{FC}$ , è possibile dimensionare le celle a combustibile considerando solamente la potenza media del ciclo considerato.

Nota la potenza media del ciclo calcolata alle ruote, pari a circa 6 kW, e considerando l'efficienza della cella combustibile, della trasmissione elettrica, e dei motori elettrici pari rispettivamente a 0.5, 0.98 e 0.9 è possibile ricavare la potenza della cella.

$$Power FC = \frac{Average power}{\eta_{FC} \cdot \eta_{TR} \cdot \eta_{EM}} = 13.6 \, kW$$

Considerando il risultato ottenuto è stata scelto il seguente stack: Hydrogenics HyPM HD 16 (Tabella 4-4).

Hydrogenics HyPM HD 16			
Maximum Power [kW]	16.5		
Voltage Range [V]	40 to 80		
Maximum Operating Current [A]	350		
Dimensions (L x W x H) [cm]	94.9 x 44.8 x 31.2		
Mass [kg]	92		
Peak Net Efficiency [%]	53		
Time from Idle to Peak Power [s]	≤ 5		

Tabella 4-4 –	- Dati d	i targa	della	fuel	cell
---------------	----------	---------	-------	------	------

#### 4.1.6 Dimensionamento del serbatoio di idrogeno

Conoscendo l'energia totale spesa per km (Tabella 4-2) è possibile ricavare il consumo di idrogeno per km utilizzando i dati elencati in precedenza.

Energy consumption = 
$$\frac{\text{Total energy spent per km}}{(\eta_{FC} \cdot \eta_{TR} \cdot \eta_{EM})} = 0.29 \, kWh/km$$

Inoltre è possibile calcolare il consumo di idrogeno conoscendo il potere calorifico inferiore dell'idrogeno pressurizzato a 700 bar (1,31 kWh / l) [9].

$$H_2$$
 consumption =  $\frac{Energy \ consumed}{LHV \ H_2} = 0.22 \ l/km$ 

L'autonomia del veicolo, come definito precedentemente, deve essere pari ad almeno 400 km. Di conseguenza il serbatoio dovrà avere una capacità pari a:

$$H_2 Tank = Range \cdot H_2 consumption = 88 l$$

Considerando il risultato ottenuto è stata scelto un serbatoio da 100 l in fibra di carbonio dal catalogo Faber.

# 4.2 Sviluppo di una strategia di gestione energetica del motore a combustione interna di un veicolo ibrido serie

I veicoli ibrido-serie permettono di superare uno dei principali limiti dei veicoli elettrici: la limitata autonomia. L'ibrido serie è particolarmente adatto a missioni di tipo urbano (tipicamente con funzionamento in puro elettrico) e suburbano (con l'ausilio del gruppo estensore dell'autonomia) anche per impieghi con missioni programmabili che prevedano la possibilità della ricarica delle batterie dalla rete (ibrido plug-in) [28][37]

Tuttavia la presenza di un range extender, nel powertrain del veicolo, deve essere opportunamente ottimizzata.

Lo scopo di questa sezione è quello di massimizzare il rendimento globale di un veicolo ibrido serie, in modo tale da minimizzare sia il consumo di combustibile che le emissioni in atmosfera.

# 4.2.1 Caratteristiche del powertrain di un ipotetico veicolo in esame

Questa sezione fa riferimento alla configurazione di un generico ibrido serie con caratteristiche simili a quelle di un veicolo convenzionale che abbia le funzioni di passenger car.

In Tabella 4-5 ed in Figura 4-4 sono riportate le caratteristiche principali del veicolo in esame ed il layout del suo powertrain.

Peso [kg]	
Area frontale del veicolo [m <sup>2</sup> ]	2
Coefficiente di penetrazione aerodinamica	0.25
Capacità Batterie [kWh]	8.5
Capacità Supercapacitors [Wh]	60

Tabella 4-5 –	Caratteristiche	principali	del veicolo
	Caracteristicite	principan	



Figura 4-4 – Power train del veicolo in esame

# 4.2.2 Modalità di funzionamento

Qui di seguito sono elencate le varie modalità di funzionamento con i relativi rendimenti di conversione utilizzati per svolgere l'analisi energetica:

Modalità solo elettrica: il motore è spento ed il veicolo è alimentato unicamente dalle batterie.



Modalità solo termica: la trazione del veicolo viene assicurata dal solo motore a combustione interna accoppiato con il generatore elettrico, mentre le batterie non vengono ne ricaricate ne erogano corrente.



Modalità ibrida: la trazione viene assicurata sia dal motore a combustione interna accoppiato al generatore sia dalle batterie.



Modalità termica con ricarica delle batterie: la trazione viene assicurata dal motore a combustione interna accoppiato al generatore, che ricarica anche le batterie.



Modalità frenata rigenerativa: il motore a combustione interna è spento e il motore di trazione viene usato come generatore per ricaricare le batterie.



Modalità ricarica delle batterie: Il motore di trazione non è alimentato e il motore a combustione interna accoppiato al generatore ricarica le batterie.



Modalità ibrida di ricarica delle batterie: sia il motore a combustione interna accoppiato al generatore che il motore di trazione (usato come generatore) ricaricano le batterie.



# 4.2.3 Caratteristiche del motore a combustione interna

Per dare più attendibilità all'analisi energetica è stato preso in considerazione un motore a combustione interna commerciale, di cui si conoscono le curve caratteristiche di funzionamento e il rendimento di conversione (Figura 4-5). Il motore scelto è quello della Smart 0.8Cdi.

Come detto in precedenza, lavorando con un veicolo ibrido serie, si ha il vantaggio che il motore termico è svincolato da qualsiasi funzione di trazione, e opera praticamente a punto fisso. La condizione di funzionamento ottimale è, ovviamente, quella che ne minimizza il consumo specifico. Quando l'ICE è acceso può erogare la potenza  $P_{MCI}$ , con infinite scelte di coppia T [Nm] e numero di giri n [RPM]. Considerando il consumo specifico del motore a combustione interna come funzione di T e n, si possono determinare i valori ottimali che minimizzano il consumo specifico, T<sub>ott</sub> e n<sub>ott</sub>. Una possibile maniera di imporre all'ICE di operare nel punto di lavoro (T<sub>ott</sub>, n<sub>ott</sub>), è di usare un regolatore di velocità angolare sull'ICE, che abbia come riferimento proprio n<sub>ott</sub>, permettendogli di erogare la potenza  $P_{MCI}$ .[28]

La scelta quindi ricade sul punto di funzionamento per cui:  $T_{ott}$  = 70 e  $n_{ott}$  = 2000 (SFC = 211 g/kWh).



Figura 4-5 – SFC in funzione della coppia e degli RPM

# 4.2.4 User needs analysis

La potenza necessaria alle ruote di un veicolo per compiere un determinato ciclo di marcia deve essere tale da vincere tutte le forze che si oppongono al moto del veicolo e da accelerare il veicolo in caso di necessità. È data perciò, dalla somma di diversi contributi [29]:

$$P_w = P_{in} + P_{Tyre} + P_{aero} + P_{slope}$$

 $P_{slope}$  è la potenza persa a causa dell'inclinazione della strada;

$$P_{slope} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \nu;$$

dove:

- *m* è la massa del veicolo [kg];
- g è l'accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>];
- α è l'inclinazione della strada [rad];
- v è la velocità [km/h].

Questo termine viene trascurato perché gli strumenti (in particolare il GPS) non forniscono valori sufficientemente attendibili di altitudine. Questa semplificazione non crea eccessivi errori nell'analisi energetica, perché le missioni effettuati dai veicoli possono essere considerati come iniziati e terminati nello stesso luogo, così in prima approssimazione la pendenza non ha un ruolo importante.

 $P_{in}$  è la potenza richiesta per accelerare il veicolo

$$P_{in}=m\cdot a\cdot v$$

dove:

• *a* è l'accelerazione;

 $P_{Tvre}$  è la potenza persa nell'attrito ruote – terreno

 $P_{Tvre} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha \cdot v$ 

 $f = 0.013 + 6.5 \cdot 10^{-6} \cdot v$  è il coefficiente di rotolamento;

Paero è la potenza persa nell'attrito veicolo - aria

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot C_x \cdot A \cdot v^3 \tag{5}$$

dove:

- $\rho_{air}$  è la densità dell'aria (~ 1.207 g/m<sup>3</sup>);
- $C_x$  è il coefficiente di penetrazione aerodinamica;
- $A \neq l'area frontale del veicolo [m<sup>2</sup>].$

#### 4.2.5 Simulazione delle correnti

- Massimizzare l'autonomia del veicolo;
- Preservare lo SOH (state of health) dei sistemi di stoccaggio;

È infatti noto, che i rendimenti di carica/scarica di una batteria dipendono fortemente dalla corrente in ingresso/entrata e che correnti troppo elevate a lungo andare danneggiano le batterie o comunque ne riducono le prestazioni. Un veicolo dedicato al trasporto urbano compie dei cicli di marcia caratterizzati da limitati tratti a velocità costante e numerose inversioni di accelerazione. L'efficienza globale di un veicolo elettrico alimentato a batterie subisce fortemente le irregolarità del ciclo di marcia, motivo per cui la gestione energetica dei componenti deve essere ottimizzata. È evidente che il power managment del veicolo deve essere ottimizzato in modo tale che il guidatore non debba risentirne con prestazioni minori rispetto alle potenzialità della tecnologia, ma al contrario debba poter beneficiare dei vantaggi della trazione elettrica.

Di conseguenza per il calcolo della corrente realmente erogata/assorbita dall'unità batteria e dai supercondensatori si è ricorsi ad un artificio matematico. Dapprima si è calcolata la potenza, che deve essere fornita al motore elettrico, per far muovere il veicolo ( $P_{LINK}$ ):

$$P_{LINK}[W] = \frac{P_{ruote}[W]}{\eta_{MR} * \eta_{INV} * \eta_{TR}}$$

dove:

- *P*<sub>ruote</sub> è la potenza meccanica necessaria alle ruote [W];
- $\eta_{MR}$  è il rendimento dei motori-ruota;

- $\eta_{INV}$  è il rendimento degli inverter presenti su ogni ruota;
- $\eta_{TR}$  è il rendimento di trasmissione dell'energia elettrica.

Da questa si ricava la corrente presente alle sbarre del DC-link ( $I_{LINK}$ ) mediante l'espressione:

$$I_{LINK}[A] = \frac{P_{LINK}[W]}{V_{LINK}[V]}$$

dove:

•  $V_{LINK}$  è la tensione del DC-link [V].

L'unità batterie e i supercondensatori sono sottoposti a tensioni diverse, la corrente al link non ne rappresenta la somma aritmetica.

Si è ricorsi al calcolo della corrente che teoricamente la batteria potrebbe erogare/assorbire durante il ciclo di marcia, e facendo riferimento ad un valore minimo (Current BU limite), sia per quanto riguarda l'erogazione che per l'assorbimento, è possibile conoscere la corrente realmente erogata/assorbita dall'unità batterie (I<sub>BU reale</sub>).

Di seguito (Figura 4-6) si riporta lo schema utilizzato.

Nota la corrente realmente erogata/assorbita dall'unità batterie ( $I_{BU reale}$ ) si ricava la potenza fornita/assorbita dalle BU ( $P_{BU}$ ):

$$P_{BU}[W] = I_{BU reale}[A] * V_{BU}[V]$$

Quando l'unità batterie non è in grado di fornire da sola la potenza necessaria al link, entrano in funzione i supercondensatori, che colmano la richiesta di potenza, mediante la corrente realmente erogata/assorbita dai supercondensatori ( $I_{UC reale}$ ), da cui si calcola la potenza fornita/assorbita ( $P_{UC}$ ):

$$P_{UC}[W] = I_{UC reale}[A] * V_{UC}[V]$$

dove:

- V<sub>BU</sub> è la tensione ai capi dell'unità batterie [V];
- V<sub>UC</sub> è la tensione ai capi dei supercondensatori [V].

Integrando rispettivamente le potenze ottenute, si ottiene l'energia fornita/assorbita dall'unità batterie ( $E_{BU}$ ) e dai supercondensatori ( $E_{UC}$ ):

$$\begin{split} E_{BU}[kWh] &= \int_{t-\Delta t}^{t} P_{BU} dt + E_{BU}(t-\Delta t) \\ E_{UC}[kWh] &= \int_{t-\Delta t}^{t} P_{UC} dt + E_{UC}(t-\Delta t) \end{split}$$



Figura 4-6 – Algoritmo usato per simulare le correnti

#### 4.2.6 Simulazione del funzionamento del motore a combustione interna

Quando la potenza richiesta dalle condizioni operative del veicolo (così come determinate dai comandi del pilota e dalle caratteristiche del percorso) è molto bassa, può non essere conveniente mantenere l'ICE acceso e funzionante in zone di bassa efficienza, e può quindi essere conveniente spegnerlo temporaneamente.

La gestione del motore a combustione interna è basata su un controllo dello stato di carica delle batterie SOC, i cui valori minimi e massimi sono assegnati garantendo un utilizzo ottimale in termini di tempo di vita del pacco batterie.. Il SOC batteria istantaneo viene calcolato come il rapporto tra la carica rimanente (i kWh<sub>BU</sub> in quell'istante) e quella che si ha quando l'accumulatore è nel suo stato di massima carica (kWh<sub>BU</sub> *iniziali*):

$$SOC = \frac{kWh_{BU \text{ istantanei}}}{kWh_{BU \text{ iniziali}}}$$

Dove i  $kWh_{BU}$  istantanei si ottengono sottraendo ai  $kWh_{BU}$  iniziali l'energia erogata dall'unità batterie in quell'istante e sommando la quota di energia proveniente dall'accensione del motore a combustione interna:

$$kWh_{BU \, istantanei} = kWh_{BU \, iniziali} - \left(\frac{I_{BU \, reale} \left[A\right] * V_{BU} \left[V\right]}{1000} * \Delta t \left[h\right]\right) + \left(P_{MCI} \left[kW\right] * \Delta t \left[h\right] * on / off\right)$$

dove:

- I<sub>BU</sub> reale è la corrente realmente erogata/assorbita dall'unità batterie [A];
- V<sub>BU</sub> è la tensione ai capi dell'unità batterie [V];
- Δt è l'intervallo di tempo considerato [h];
- P<sub>MCI</sub>. è la potenza erogata dal motore a combustione interna [kW];
- On/off sta per motore a combustione interna acceso o spento per cui vale rispettivamente 1 o 0.

Se il SOC batteria istantaneo è superiore al  $SOC_{min}$  allora il motore a combustione interna è spento e il veicolo è in modalità puramente elettrica, quando il SOC batteria istantaneo scende sotto al valore di  $SOC_{min}$ , l'ICE si accende e si calcola il consumo di combustibile [g]:

 $consumo \ di \ combustibile[g] = SFC[g/kWh] * E_{MCI}[kWh]$ 

dove:

- SFC è il consumo specifico di combustibile scelto [g/kWh];
- E<sub>MCI</sub> è l'energia del motore a combustione interna [kWh] calcolata integrandone la potenza termica fornita dal combustibile P<sub>fuel</sub> [W]:

$$P_{fuel}[W] = \frac{P_{MCI}[W]}{\eta_{MCI}}$$

$$E_{MCI}[kWh] = \int_{t-\Delta t}^{t} P_{fuel} dt + E_{MCI}(t-\Delta t)$$

#### 4.2.7 Simulazione energetica su cicli reali

L'analisi energetica è stata compiuta considerando dei cicli di marcia di riferimento reali. Dall'andamento della velocità in funzione del tempo si è dunque risaliti alla potenza richiesta alle ruote istante per istante e di conseguenza alle correnti fornite rispettivamente dall'unità batterie e dall'unità dei supercapacitors. In base allo stato di

carica delle batterie sono state studiate diverse strategie di gestione del motore a combustione interna.

Sono stati considerati due differenti cicli di marcia reali: il primo più "moderato" (Figura 4-7) ed il secondo più "nervoso" (Figura 4-8). Il parametro oggettivo di riferimento per distinguere i due cicli e la deviazione standard della velocità.



Figura 4-7 – Ciclo di marcia "moderato"

Tabella 4-6 – Caratteristiche del ciclo "moderato"

Distanza [km]	16,7
Durata [s]	2760
Velocità media [km/h]	21,7
Velocità massima [km/h]	73,8

Il ciclo di marcia considerato viene ripetuto più volte nella prova, al fine di poter lavorare con dati realistici, ottenendo così i dati in Tabella 4-7.

Tabella 4-7 – Carateristiche del ciclo "moderato" ripetuto

Spazio percorso [km]	300
Tempo impiegato [h]	13,8
Velocità media [km/h]	21,8

Velocità max [km/h]	73,8
dev. Std velocità [km/h]	19,6
Potenza max [kW]	84,4
Potenza media [kW]	2,1
Energia spesa [kJ]	106.374
Energia spesa al km [kJ/km]	354

Tabella 4-8 – Caratteristiche del ciclo "nervoso"

Distanza [km]	25,1
Durata [s]	2686
Velocità media [km/h]	33,6
Velocità massima [km/h]	91,9

Anche in questo caso il ciclo di marcia considerato viene ripetuto più volte nella prova, al fine di poter lavorare con dati realistici, ottenendo così i dati in Tabella 4-9.

Spazio percorso [km]	326
Tempo impiegato [h]	9,7
Velocità media [km/h]	33,6
Velocità max [km/h]	91,9
dev. Std velocità [km/h]	23,5
Potenza max [kW]	139,9
Potenza media [kW]	3,6
Energia spesa [kJ]	123.533
Energia spesa al km [kJ/km]	379

Tabella 4-9 – Caratteristiche del ciclo "nervoso" ripetuto

In Figura 4-9 vengono mostrati gli andamenti delle grandezze di interesse in funzione del tempo (ciclo moderato).

Nell'elaborazione di questa trattazione si è trascurato il warm-up. Inoltre si è trascurato il fatto che ogni accensione e spegnimento del motore a combustione interna, include un elemento di penalizzazione, che corrisponde al "costo" di ognuno di essi, conseguenza sia del combustibile utilizzato per portare in rotazione il motore ed assicurare una combustione regolare, sia del logorio aggiuntivo dovuto alla modesta lubrificazione dei cuscinetti durante le fasi di messa in moto delle parti rotanti.



Figura 4-8 – Ciclo di marcia "nervoso"



Figura 4-9 – Andamento delle correnti in funzione del tempo

Si può notare come i supercondensatori sopperiscano alla richiesta repentina di coppia, fornendo corrente in anticipo rispetto all'unità batterie. In seguito la corrente

erogata dagli UC diminuisce, fino a ricaricarsi a spese dei BU. Quando la richiesta di coppia è meno repentina l'unità batterie è in grado di seguire il carico lasciando agli UC un compito minimo; la corrente è erogata principalmente dai BU. La corrente di link non rappresenta la somma delle due correnti proprio per il fatto che l'unità batterie e i supercondensatori si trovano a tensioni differenti.

All'inizio del ciclo di marcia il motore a combustione interna è spento essendo il SOC batteria pari ad 1, cioè l'unità batteria si considera completamente carica. Durante la marcia del veicolo lo stato di carica diminuisce (più o meno velocemente a seconda del recupero in frenata dell'energia) in seguito alla corrente erogata dalle batterie.

Si impone un SOC minimo al di sotto del quale il motore a combustione interna si accende e di conseguenza viene calcolato il consumo di combustibile del veicolo. Quando il SOC batteria arriva allo stato di carica massimo, considerato pari ad 1, l'ICE viene nuovamente spento, il veicolo procede in modalità puramente elettrica ed i consumi si azzerano.

In Figura 4-10 viene mostrato l'andamento del SOC batteria, considerando un SOC minimo pari a 0,7.

Per quanto riguarda lo stato di carica dei supercondensatori, questo ha un andamento che varia ciclicamente e molto velocemente. Il suo valore pari a zero, si verifica raramente, solitamente questo oscilla in valori compresi tra 0,2 e 0,8.



Figura 4-10 – Andamento del SOC in funzione del tempo

Le suddette operazioni vengono ripetute variando il SOC minimo dell'unità batterie in modo da analizzare la variazione del consumo di combustibile [km/l], in funzione dei vari SOC<sub>min</sub> scelti. Si riporta in Figura 4-11 il grafico prodotto con i relativi valori riferiti al ciclo "moderato" ed al ciclo "nervoso"



Figura 4-11 – Consumi in funzione del SOC minimo

Come si può notare dal grafico il massimo della curva rappresentante i consumi di combustibile per il ciclo nervoso è spostato verso valori di SOC minimo maggiori proprio perché tale ciclo è caratterizzato da un valore superiore della deviazione standard della velocità, e quindi presenta più elevate inversioni di accelerazione. Queste inversioni influenzano la corrente di batteria che si scarica più velocemente, rispetto al ciclo di marcia "moderato". Ciò implica che il motore a combustione interna viene acceso più volte provocando una diminuzione dei kilometri percorribili con un litro di gasolio.

Si riportano i valori dei SOC minimi e consumi per entrambi i cicli:

Ciclo di marcia	SOC minimo	consumi [km/l]
moderato	0,57	34,7
nervoso	0,64	28,8

Tabella 4-10 – SOC minimi scelti e relativi consumi

# 4.2.8 Conclusioni

Dall'analisi compiuta è stato dimostrato che l'utilizzo intermittente del motore a combustione interna garantisce un aumento dei kilometri percorsi con un litro di gasolio.

Con l'analisi compiuta sono stati ottenuti dei consumi pari 34,7 km/l (SOC minimo 0,57) per un ciclo di marcia rappresentante uno stile di guida moderato, e 28,8 km/l (SOC minimo 0,64) per un ciclo di marcia con guida nervosa. Nel secondo caso l'unità batterie subisce maggiormente le repentine e numerose inversioni di velocità presenti nel ciclo di marcia, e di conseguenza la batteria si scarica più velocemente rispetto al ciclo di marcia "moderato". L'efficienza globale di un veicolo alimentato a batterie è influenzato pesantemente dalle irregolarità del ciclo di marcia, motivo per cui la gestione energetica dei componenti deve essere ottimizzata.

Un generico veicolo ibrido-serie, riconoscendo tramite la deviazione standard della velocità il tipo di stile di guida del pilota, può essere in grado di stabilire la migliore strategia energetica e quindi qual è il SOC minimo da prendere come riferimento, al di sotto del quale far intervenire il motore a combustione interna a ricaricare le batterie e a colmare la richiesta di potenza necessaria al veicolo. In questo modo non dovrà essere il pilota a preoccuparsi di dover guidare in maniera virtuosa, ma sarà il sistema stesso ad intervenire e mediare i suoi comportamenti, al fine di preservare ogni singolo componente dell'intero sistema e di ottimizzare i consumi.

# 5 Integrazione dei veicoli elettrici all'interno delle Smart grids

# 5.1 Impatto delle FER sulla rete elettrica

Negli ultimi anni, complice anche la massiccia incentivazione da parte dei governi, il panorama energetico Europeo è profondamente cambiato. Il modello di produzione e di consumo è stato drasticamente sconvolto dall'introduzione nel mercato di numerosi impianti alimentati da fonti energetiche rinnovabili. Se da un lato questo ha causato una diminuzione delle esternalità dei sistemi di produzione dall'altra ha avuto un forte impatto sulla sicurezza della rete elettrica [30].

Le reti elettriche, infatti, sono ancora gestite come reti passive, nello stesso modo nel quale sono state progettate.

L'introduzione delle fonti energetiche rinnovabili ha di conseguenza portato a delle problematiche legate all'esecuzione dei calcoli del load flow che devono tener conto dell'aleatorietà della produzione rinnovabile. I principali vincoli tecnici ad una massiccia diffusione delle FER sono:

- 1. Inversione del flusso di potenza sul trasformatore AT/MT. Avviene quando l'energia prodotta da impianti di produzione connessi in MT supera il prelievo dei carichi della rete (Figura 5-1). Il numero di ore in cui questo fenomeno può avvenire è normato dalla CEI 0-16 (5%)
- 2. Incremento della corrente di cortocircuito. Lo sviluppo della generazione distribuita sulla rete causa l'incremento della corrente di corto circuito che deve necessariamente essere mantenuta al di sotto del potere di interruzione degli organi di manovra.
- 3. Variazioni lente di tensione. La connessione di un impianto di produzione di energia lungo una linea MT causa l'incremento della tensione in quel punto e, più in generale, la variazione del profilo di tensione lungo la linea.
- 4. Variazione rapida di tensione. Nel momento in cui un impianto di produzione si disconnette dalla rete si determina una variazione della tensione in quel nodo e lungo la linea.
- 5. Limiti di transito per vincoli termici sulle linee. In caso di inversioni di flusso occorre garantire che, in nessun tratto della linea, il valore della corrente sia superiore alla portata di regime dei conduttori.



Figura 5-1 – Se l'energia prodotta sulle reti MT è superiore rispetto a quella assorbita si ha inversione di flusso rispetto alle normali condizioni di funzionamento

# 5.2 Impatto dei veicoli elettrici sulla rete elettrica

In letteratura possono essere trovati molti studi e ricerche che descrivono in maniera molto ottimistica quella che sarà l'evoluzione del mercato della mobilità urbana, con particolare riferimento alla mobilità elettrica [31]. In Clement et al. [32] si parla addirittura di un penetrazione d si parla addirittura di una penetrazione del 28% per i veicoli ibridi plug-in in Belgio nel 2030.

Attraverso il modello TREMOVE (Logghe et al., 2006) [33] l'Unione Europea ha stimato che i veicoli ibridi raggiungeranno una fetta di mercato pari al 25% nel 2030. È molto difficile prevedere a lungo termine quale sarà la percentuale di veicoli elettrici sul mercato. Al momento è solo possibile disegnare degli scenari più o meno ottimistici.

Per comprendere, in maniera qualitativa, quale potrebbe essere l'impatto dei veicoli elettrici sulla rete elettrica è necessario avere informazioni specifiche rispetto alla capacità della rete, al consumo, ma soprattutto in quale momento della giornata tale consumo è più richiesto.

In Figura 5-2 è interessante notare come, fatta eccezione per i mesi estivi, la potenza di picco è richiesta alla rete elettrica tra le 16.30 e le 18, periodo nel quale ci sarebbe anche una grande richiesta da parte dei veicoli elettrici (lavoratori che tornando a casa ricaricherebbero le loro auto in modo tale che esse potessero essere cariche per il mattino successivo). Questa analisi è particolarmente interessante alla luce di alcuni risultati di uno studio del JRC [31] che sottolinea proprio come non è l'incidenza totale su base annua ad esser dovuta considerare per la valutazione dell'impatto dei veicoli elettrici sulla rete, ma la sua distribuzione su base giornaliera.



Figura 5-2 – Potenza richiesta (in GW) in funzione dei mesi e delle ore del giorno

Per comprendere meglio quale potrebbe essere il possibile effetto su base giornaliera si prendano in considerazione il grafico rappresentato in Figura 5-3. Questa simulazione tiene conto di uno scenario in cui i veicoli elettrici costituiscono il 25% del numero totale dei veicoli. È possibile apprezzare il notevole impatto dei veicoli elettrici sulla rete.

È necessario quindi adottare strategie adeguate in modo tale da evitare possibili danni alla rete elettrica. In questo contesto sarebbe molto utile shiftare la richiesta dovuta alla ricarica dei veicoli elettrici in maniera controllata ed utilizzare la capacità di accumulo dei veicoli elettrici in maniera bidirezionale. Questo concetto è alla base della strategia del V2G (Vehicle to grid).



Figura 5-3 – Andamento della domanda di consumo su scala giornaliera e mensile

# 5.3 Sviluppo delle reti di distribuzione attive

In base a quanto definito nei paragrafi precedenti si comprende la necessita, per le reti di distribuzione dell'energia elettrica di essere flessibili, economiche, affidabili e usufruendo inoltre dei benefici della liberalizzazione del mercato.

Una moderna Smart Grid deve essere progettata per promuovere l'uso diffuso della micro-generazione, viste le previsioni di crescita dell'apporto di energia da fonti rinnovabili e la possibilità di ricorrere a diversi sistemi di accumulo basati su diverse tecnologie.

La rete deve essere in grado di gestire il surplus di energia di una data zona e indirizzarlo verso le aree che ne hanno carenza in tempo reale. Si passa quindi all'uso di energia che non proviene solo da impianti centralizzati ma da più punti della rete che possa essere eventualmente stoccata per essere riutilizzata nel momento in cui ce n'è la necessità.







Figura 5-5 - Funzionamento della rete elettrica sul modello di internet

All'interno di una rete elettrica si possono individuare tre segmenti: la generazione, la trasmissione/distribuzione (dal punto di generazione al punto di utilizzo) e l'impiego

finale. Le nuove Smart Grids devono essere in grado di testare in ogni momento questi tre segmenti, in modo da garantire affidabilità, sicurezza e potenza costante. L'elemento principale di queste reti è il contatore elettronico, che deve permettere di mettere in contatto le utenze e scambiare informazioni in tempo reale. Grazie ai nuovi contatori intelligenti il flusso di elettricità può avvenire in modo bi-direzionale, attingendo corrente elettrica dalla rete principale o rivendendo l'energia in surplus. Inoltre il contatore intelligente può adattare il profilo di consumo al costo dell'energia e appiattire il picco di consumo giornaliero, ad esempio, ritardando il ciclo di riscaldamento dell'acqua della lavatrice ad un momento in cui l'energia costi poco o accumulando energia all'interno di uno storage residenziale.

Con questi dispositivi l'utente diventa parte della rete e il gestore può modulare l'offerta di energia a seconda della reale richiesta, ottimizzando cosi i costi di produzione dell'energia e quelli per la gestione della rete.

La Smart Grid è quindi una infrastruttura dinamica e interattiva in grado di scambiare energia e informazioni in tempo reale. Ne consegue che, la possibilità di avere un auto che può prendere parte a questa complessa infrastruttura, non può non essere considerata nell'ambito della sua valutazione globale.

# 5.4 Utilizzo dell'auto elettrica per la fornitura di servizi per la rete

Come anticipato nell'introduzione, la modalità V2G permette di sfruttare le batterie in diversi modi vantaggiosi sia dal punto di vista tecnico (per la rete) sia dal punto di vista economico. [34-36]

Le batterie dei veicoli elettrici possono offrire alla rete diversi servizi.

I principali sono riportati di seguito.

# 5.4.1 Power Peak

Quando è richiesto un aumento temporaneo della potenza in rete, vengono momentaneamente messe in servizio alcune centrali. Con la tecnica V2G le batterie delle auto possono essere utilizzate per questa funzione in maniera meno dispendiosa e più rapida rispetto a quella di mettere in servizio una centrale. Il sistema di accumulo viene utilizzato per far fronte a variazioni rapide del carico livellandolo sulla potenza media.

La durata di accensione per far fronte ai picchi è in media di 3-5 ore. In regime V2G questa richiesta di potenza è affrontabile solo con un numero elevato di veicoli collegati contemporaneamente alla rete (ad esempio in un parcheggio).

Le batterie dei veicoli elettrici possono fornire energia (attraverso la scarica) durante le fasi di richiesta di potenza e assorbirla (attraverso la carica) durante le fasi di basso carico, così da diminuire la differenza tra il picco di carico massimo e le condizioni di carico minimo. Questa operazione è definita Peak Shaving, e l'effetto è riportato nella Figura 2-6.



Figura 5-6 - Principali servizi che un veicolo elettrico può offrire alla rete (V2G)



Figura 5-7 – Utilizzo degli storage deglii EVs per sopperire alla potenza di picco

# 5.4.2 Spinning Reserve

Il termine Spinning Reserve si riferisce a dispositivi che sono in grado di fornire picchi di potenza in maniera rapida (10 minuti) su richiesta del gestore della rete.

Tipicamente questi generatori vengono chiamati a produrre potenza per 20-50 volte all'anno e sono pagati in base alla loro capacità di produrre energia durante un evento non programmato e in relazione alla potenza erogata.

Questa è una condizione perfetta per lo sfruttamento delle batterie degli EV, che costituiscono una spinning reserve solo per il fatto di essere collegate alla smart grid. Anche l'utente trae un vantaggio da questa condizione perché l'energia erogata viene pagata in base al tempo di spinning.



Figura 5-8 – Regolazione effettuata tramite lo storage presente all'interno del veicolo

# 5.4.3 Regolazione di Frequenza

La frequenza del sistema deve essere mantenuta a 50Hz per garantire il corretto funzionamento delle utenze collegate alla rete.

Se la frequenza si alza, significa che i carichi collegati in rete non sono sufficienti per assorbire tutta la potenza generata, occorre quindi aumentare il carico in rete oppure diminuire la potenza elettrica prodotta.

Se la frequenza si abbassa, significa che il carico collegato alla rete richiede una potenza superiore a quella erogata in quel momento, occorre quindi ridurre il carico oppure aumentare la produzione di potenza.

La regolazione della frequenza deve avvenire sotto il controllo diretto del gestore della rete che invia segnali al generatore il quale deve rispondere entro un minuto aumentando (regolazione verso l'alto) o diminuendo (regolazione verso il basso) la potenza generata.

In modalità V2G le batterie offrono un valido aiuto per la regolazione di frequenza perché attraverso il processo di carica possono assorbire potenza dalla rete in caso di sovra generazione, mentre con il processo di scarica possono funzionare da generatore nel caso di sotto generazione.



Figura 5-9 – Utilizzo del veicolo nel momento in cui è parcheggiato per partecipare alla regolazione della frequenza di rete

#### 5.4.4 Backup e immagazzinamento dell'energia da fonti rinnovabili

Uno dei compiti del V2G è quello di supportare le fonti di energia rinnovabile in modo da ottimizzare le operazioni di bilanciamento della rete.

L'eolico e il fotovoltaico sono due fonti di energia rinnovabili non programmabili (la loro produzione dipende dai fattori atmosferici) e spesso i loro picchi produttivi non coincidono con le richieste di carico della rete. Gli accumulatori permettono di assorbire l'energia rinnovabile prodotta nei periodi di basso carico e di re-iniettarla in rete nei momenti di maggiore carico. Si ha quindi un disaccoppiamento temporale tra la produzione di energia e il suo utilizzo.

La capacità di immagazzinare e fornire energia da parte delle batterie è però limitata nel tempo e dipende ovviamente dalla potenza installata sul veicolo.

Le batterie delle automobili connesse alla rete in modalità V2G permettono anche di effettuare operazioni di backup e di disaccoppiamento temporale della produzione, ma la soluzione ottimale dal punto di vista tecnico è quella di installare accumulatori fissi nei pressi delle centrali eoliche o fotovoltaiche.

L'energia immagazzinata nelle batterie delle automobili può anche servire da back up in caso di black out: si formano piccole isole della rete elettrica che possono rimanere alimentate fino alla risoluzione del guasto.

# 5.5 Conclusioni

Dall'analisi effettuata in questo capitolo si evince come il concetto di auto possa essere differente rispetto a quello che conosciamo. Chiaramente non tutte le tecnologie, soprattutto quelle che in questo momento sono sul mercato, permettono di dare ad essa molte più funzioni rispetto a quelle convenzionali.

Tuttavia è importante considerare anche gli aspetti negativi e le criticità legate all'utilizzo dell'auto per finalità simile a quelle descritte.

Qualora un utente mettesse a disposizione il proprio veicolo nei confronti della rete bisognerebbe tenere conto del fatto che egli metterebbe di fatto a disposizione una parte dei suoi cicli utili, che hanno quindi un determinato valore commerciale. Non è semplice però dare una stima dei cicli sottratti all'utente in quanto, soprattutto per l'effettuazione di funzioni come la frequency regulation, è necessario stressare la batterie con dei micro-cicli che possono avere un impatto notevole sulle sue prestazioni.

Inoltre, una delle problematiche da risolvere sarebbe legata alla comunicazione tra rete ed auto, in quanto le informazioni necessarie alla fornitura di servizio ancillari devono essere scambiate con dei tempi di latenza bassissimi, minori al secondo. Al momento, il sistema di comunicazione ad onde convogliate con il quale il distributore comunica con gli smart meter, non ha a disposizione una banda così elevata.

Infine è bene tenere conto che le necessità dell'utente devono avere la priorità rispetto a tutti gli altri servizi e quindi, affinché il V2G possa essere socialmente accettato, è bene che sia prevista anche una programmaticità, che da una parte consenta di definire quando il veicolo dovrà essere pienamente carico, e dall'altra che ci sia una riserva sempre disponibile affinché il guidatore possa utilizzarlo in casi di emergenza.

In sostanza, il V2G è sicuramente un concetto di notevolissimo interesse che merita di essere approfondito nei prossimi anni insieme alla sue criticità. L'impatto che avrà la generazione distribuita e gli stessi veicoli elettrici sarà sempre maggiore, e l'utilizzo aggregato dei veicoli potrà sicuramente essere una delle soluzioni.

# Conclusioni

La ricerca svolta nel corso del triennio ha permesso di identificare una metodologia di valutazione del reale impatto che un veicolo ha sull'ambiente e sul consumo delle risorse energetiche, tenendo conto di tutti quei fattori che, nell'uso reale ne migliorano o ne peggiorano le prestazioni.

È stato infatti dimostrato come le attuali procedure per la dichiarazione dei consumi e delle emissioni, possono generare risultati di scarso significato pratico se applicate a veicoli alimentati da combustibili ad impatto locale nullo, il che potrebbe affievolire l'interesse delle case costruttrici a spingere verso powertrain sempre più innovativi e su tecnologie di accumulo energetico a bordo sempre più efficienti.

L'identificazione di una procedura di calibrazione finalizzata alla modellizzazione del consumo e delle emissioni di un veicolo è uno strumento utile per prevedere quale possa essere il suo comportamento energetico ed emissivo nelle condizioni operative più critiche, dando come input al modello solamente alcuni semplici parametri motoristici. D'altra parte l'utilizzo di questi modelli potrebbe essere utilizzata anche nell'ottica del pay per use. Ovvero nel far pagare all'utilizzatore finale l'esternalità che egli causa nei confronti dell'ambiente, andando a correlare l'effettiva emissione di inquinanti ad un contributo economico proporzionale ad esso.

Inoltre, è stata proposta una nuova metodologia di valutazione energetica ed emissiva dei veicoli basata sui cicli reali, ovvero prevedendo campagne di acquisizione da effettuarsi su strada da parte di guidatori differenti. In questo ambito, l'introduzione dell'indice di valutazione sintetica dei veicoli, definito come rendimento globale, può portare a dare un'idea più attendibile della reale efficienza di un veicolo.

Tenendo conto delle indicazioni desunte dalle analisi precedenti, e proprio con la finalità di massimizzare l'indicatore rendimento globale, sono state definite alcune procedure di progettazione di componenti di un powertrain innovativo e della sua logica di gestione dei flussi energetici.

È stato, infine dimostrato come l'adozione di powertrain sempre più innovativi e sempre più elettrificati possa rivoluzionare il concetto di auto, identificando dei casi studio nei quali il veicolo, oltre al trasporto dei suoi passeggeri, ha anche un ulteriore valore aggiunto nei confronti della rete elettrica in termini di utilizzo razionale delle risorse, in particolare rinnovabili.

In questo modo è stato possibile completare la metodologia di valutazione del veicolo, che così tiene conto sia di emissioni ed consumi in fase di utilizzo del veicolo sia della sua potenziale interazione positiva con la rete elettrica.

- [1] Europea GudU. Regolamento n. 101 della Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite (ECE/ONU). 2008.
- [2] www.dieselnet.com
- [3] L. Filosomi; Valutazione energetica di veicoli innovativi; 2011; Roma
- [4] A. Alessandrini, F. Filippi, F. Orecchini, F. Ortenzi; A new method for collecting vehicle behaviour in daily use for Energy and environmental analysis; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering; 2005
- [5] A. Alessandrini, F. Orecchini; A driving cycle for electrically-driven vehicles in Rome; Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering; 2003
- [6] A.Alessandrini, F. Orecchini, F. Ortenzi, F. Villatico Campbell; Drive-style emissions testing on the latest two Honda hybrid technologies; European Transport Research Review; 2009
- [7] F Villatico Campbell, A Alessandrini, F Orecchini, F Ortenzi; Type approval procedures based on real driving cycle operating conditions and their potential effects on alternative powertrains diffusion; International Conference on Transport and Environment: A global challenge technological and policy solution; 2007
- [8] A. Alessandrini, A. Forina, F. Ortenzi; Metodo di valutazione in tempo reale del comportamento energetico-emissivo di un veicolo diesel; 65° Congresso Nazionale, ATI; 2010
- [9] A. Alessandrini, F. Filippi, F. Ortenzi, F. Orecchini; Hybrid Vehicle Sustainability Evaluation: The Honda Civic Hybrid Case; EVS25, The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition; 2010
- [10] F. Ortenzi, M. Costagliola; A New Method to Calculate Instantaneous Vehicle Emissions using OBD Data; SAE Technical Paper; 2010
- [11] A. Alessandrini, A. Cattivera, F. Filippi, F. Ortenzi; Driving style influence on car CO2 emissions; 20th International Emission Inventory Conference - "Emission Inventories - Meeting the Challenges Posed by Emerging Global, National, and Regional and Local Air Quality Issues"; 2012
- [12] A. Alessandrini, F. Filippi, F. Ortenzi, F. Orecchini; Evaluation of a multipurpose hybrid vehicle concept; World Electric Vehicle Journal Vol. 4 - ISSN 2032-6653; 2010
- [13] www.horiba.com
- [14] www.avl.com
- [15] A. Cattivera, J. Ferrer, F. Ortenzi, L. Rambaldi; Utilizzo dei dati provenienti dalla diagnostica dei veicoli per il calcolo dei consumo e della CO2; Congresso ATI 2011.
- [16] A. Alessandrini, F. Orecchini, F. Ortenzi, L. Rambaldi, A. Cattivera; Definizione di stile di guida e sua influenza sui consumi e realizzazione di uno strumento onboard semplificato per la sua misura; Progetto di ricerca PEGASUS contratto di collaborazione ENEA-CTL; 2011
- [17] E. Bocci, L. Rambaldi; Soot Emission Modelization of a Diesel Engine from Experimental Data; ICCSA (4) 2011, Vol. 6785 Springer; 2011
- [18] G. Ferrari; Motori a combustione interna; 2000.
- [19] AVL; AVL Micro Soot Sensor Operating Manual Product Guide; 2009
- [20] P.Q. Tan, Z.Y. Hu, K.Y. Deng, J.X. Lu, D.M. Lou, G. Wan; Particulate matter emission modelling based on soot and SOF from direct injection diesel engines; Energy Conversion and Management; 2007
- [21] L. Rambaldi, A. Santiangeli, Design of an Innovative Powertrain of a Zero emission hydrogen powered vehicle, International Journal of Hydrogen, 2010
- [22] F. Viotti, C. Fiori; L. Filosomi; Analisi sperimentale delle prestazioni energetico emissive di un veicolo ibrido plug-in, 2011
- [23] Centro Ricerche FIAT; Single Shaft Parellel Hybrid CNG Engine based FIAT Multipla Gasdriver; 2003
- [24] EUCAR CONCAWE JRC Research Centre of European Commission; Final Report on Well-to-Wheels analysis of future auto motive fuels and associated powertrains in the European context; 2003
- [25] P. Artuso, F.Zuccari, L. Rambaldi, D. Sbordone, A. Dell'Era, A. Santiangeli; Energy analysis of an electric minibus in real conditions; Congresso ATI 2011
- [26] Lyons, Kenworthy, Austin, Newman; The development of a driving cycle for fuel consumption and emission evaluation; Transportation Research; 1986

- [27] Kisacikoglu, Uzunoglu, Alam. Load sharing using fuzzy logic control in a fuel cell/ultracapacitor hybrid vehicle; International Journal of Hydrogen Energy; 2009
- [28] G. Brusaglino, G. Pede, E. Vitale; Sistemi di propulsione elettrica ed ibrida dalla sorgente a bordo all'attuazione meccanica; Focus Tecnologie ENEA; 2009
- [29] M. Ehsani; Y. Gao; S.E. GaY;, A. Emadi; Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, 2005
- [30] M. Delfanti, M. Merlo, A. Silvestri, M. Gallanti; Impatto della generazione diffusa sulle reti di distribuzione; Politecnico di Milano e CESI Ricerca; 2009
- [31] A. Perujo, B. Ciuffo; Potential Impact of Electric Vehicles on the Electric Supply System; 2009
- [32] Geth, Frederik, K. Clement; Impact-analysis of the charging of plug-in hybrid vehicles on the production park in Belgium. MELECON 2010-2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. IEEE, 2010.
- [33] De Ceuster, Griet, Logghe; TREMOVE Report for European Commission, DG ENV, Transport & Mobility Leuven and KU Leuven; 2004
- [34] Guille, Gross; A conceptual framework for the V2G implementation; Energy Policy; 2009
- [35] Guille, Gross; Design of a conceptual framework for the V2G implementation; Energy 2030 Conference; 2008.
- [36] Guille, Gross; The integration of PHEV aggregations into a power system with wind resources; Bulk Power System Dynamics and Control 2010 iREP Symposium; 2010.
- [37] S. Fornari; Sviluppo di strategie di gestione energetic di un veicolo ibrido serie. Caso studio: HOST; 2010
- [38] L. Vercesi; Modellizzazione delle emissioni di particolato di un'autovettura in ambito urbano; 2010

## Pubblicazioni

- 1. L. Rambaldi, A. Santiangeli, Design of an Innovative Powertrain of a Zero emission hydrogen powered vehicle, International Journal of Hydrogen
- L. Rambaldi, E. Bocci, F.Orecchini, Preliminary experimental evaluation of a four wheel motors, batteries plus ultracapacitors and series hybrid powertrain (2010) Applied Energy – Elsevier
- 3. E. Bocci, L. Rambaldi: Soot Emission Modelization of a Diesel Engine from Experimental Data. ICCSA (4) 2011, Vol. 6785 Springer (2011), S. 316-327.
- L. Rambaldi, A. Santiangeli, F. Orecchini, V. Naso: "Sviluppo di una strategia di gestione energetica del motore a combustione interna di un veicolo ibrido serie" atti 65° Congresso Nazionale dell'Associazione Termotecnica Italiana, Sessione Tecnica Tema n. 07 – Motori a Combustione Interna, Domus de Maria (CA), Settembre 2010
- P. Artuso, L. Rambaldi, D. Sbordone, A. Santiangeli; Energetic evaluation on auxiliary systems of an hydrogen hybrid minibus; SDEWES 2011 – The Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems; Dubrovnik
- 6. P. Artuso, F.Zuccari, L. Rambaldi, D. Sbordone, A. Dell'Era, A. Santiangeli; Energy analysis of an electric minibus in real conditions, Congresso ATI 2011, Cosenza.
- A. Cattivera, J. Ferrer, F. Ortenzi, L. Rambaldi; Utilizzo dei dati provenienti dalla diagnostica dei veicoli per il calcolo dei consumo e della CO2, Congresso ATI 2011, Cosenza.