



Ricerca di Sistema elettrico

## Studio delle interrelazioni tra il sistema elettrico e quello dei trasporti urbani

*Giancarlo Giuli, Massimo Mancini  
Maria Pia Valentini*

## STUDIO DELLE INTERRELAZIONI TRA IL SISTEMA ELETTRICO E QUELLO DEI TRASPORTI URBANI

Giancarlo Giuli, Massimo Mancini, Maria Pia Valentini (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità

Obiettivo: Interazione mobilità elettrica/reti intelligenti

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese, ENEA

Un sincero grazie alla società Octo Telematics S.p.a. per aver gentilmente messo a nostra disposizione una selezione di dati provenienti dai loro sistemi GPS. Senza questi dati non sarebbe stato possibile realizzare il presente lavoro.

## Indice

PARTE PRIMA.....	4
SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 DESCRIZIONE DEI DATI CAMPIONE.....	5
2.2 ANALISI DELLE SOSTE.....	6
2.3 CLASSI DI VEICOLI ELETTRICI CONSIDERATE.....	10
2.4 ANALISI PRELIMINARE. PERCORRENZA IN ELETTRICO SENZA RICARICHE INTERMEDIE NEL GIORNO PIÙ CRITICO DEL MESE.....	10
2.5 DETERMINAZIONE DELLA PERCENTUALE DI VEICOLI CAMPIONE CHE POTREBBERO ESSERE SOSTITUITI DA VEICOLI ELETTRICI.....	11
2.6 VARIAZIONE DELL'ASSORBIMENTO DI RETE IN FUNZIONE DELLA DURATA SOSTA, PER LA RICARICA, E DELLA CLASSE DI VEICOLO ELETTRICO.....	16
3 CONCLUSIONI.....	19
PARTE SECONDA.....	21
4 SOMMARIO.....	21
5 INTRODUZIONE.....	22
6 IL TRASPORTO PUBBLICO LOCALE IN ITALIA.....	22
6.1 ASPETTI ENERGETICI ED AMBIENTALI.....	23
6.2 ASPETTI TECNOLOGICI.....	29
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	32
8 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	32

## Parte Prima

### Sommario

La diffusione dei sistemi GPS anche in ambiente veicolare dà informazioni particolareggiata sull'uso del veicolo sia quotidiano e sia sulla frequenza di utilizzo nei lunghi periodi.

Queste informazioni chiariscono meglio quale è l'utilizzo che effettivamente viene fatto del veicolo.

Sulla base di queste precise informazioni si possono dedurre utili indicazioni sulla possibilità di sostituire parte del parco veicolare con veicoli elettrici.

Con i dati disponibili per un intero mese, di un consistente numero di veicoli della provincia di Roma, viene fatta una prima analisi sulle percorrenze giornaliere più critiche per verificare la percentuale di veicoli che potrebbero viaggiare in elettrico con la sola ricarica notturna.

L'analisi viene ripetuta in modo più approfondito ipotizzando che i veicoli in circolazione siano tutti elettrici di una delle sei classi di veicoli predefinite. Viene simulata la ricarica della batteria, secondo 4 diverse modalità di ricarica, per verificare se il veicolo può essere trasformato in elettrico o meno senza alterare le sue percorrenze ed il suo uso.

I risultati vengono riportati evidenziando la percentuale, per classe, dei veicoli che potrebbero essere trasformati in elettrico.

La cosa più concreta non è sapere quanti veicoli possono essere trasformati in elettrico ma quanti km, di quelli totali, verrebbero effettivamente percorsi in elettrico. Viene quindi calcolata anche questa percentuale che, per via della minor percorrenza dei veicoli elettrici rispetto alla media, risulta conseguentemente inferiore alla percentuale del numero di veicoli elettrici.

Infine da questi dati si è estratto il carico sulla rete distribuito nelle 24 ore.

## 1 Introduzione

Oggi mediante i dispositivi GPS è possibile avere dettagliate informazioni su come vengono utilizzati i veicoli. In particolare l'ENEA dispone di un consistente numero di registrazioni di spostamenti veicolari, i cui dati sono stati forniti dalla società Octo Telematics, per un intero mese di una zona contenente tutto il comune di Roma.

Queste informazioni, sono state utilizzate nell'Accordo di Programma ed elaborate opportunamente per ottenere utili indicazioni sul prevedibile sviluppo richiesto alla rete elettrica qualora un certo numero di veicoli privati con motore a combustione interna venga sostituito da veicoli elettrici (VE).

Poiché i VE, almeno nella versione base, hanno una ridotta autonomia prossima ai 100 km, si sono utilizzati i dati a disposizione per valutare quanti veicoli a combustione interna (VCI) siano, con queste limitazioni, già idonei per essere trasformati in VE senza dover modificare l'utilizzo del veicolo.

In alcune versioni di VE si è parzialmente risolto il problema dell'autonomia estendendola anche oltre i 300 km aumentando la capacità della batteria con il non trascurabile inconveniente di far lievitare ulteriormente i già elevati costi.

Lo studio che verrà presentato è rivolto a 6 diverse classi di VE partendo dal più economico Quadriciclo Elettrico per arrivare al più costoso SUV.

Indipendentemente dalle 6 versioni scelte, l'interesse maggiore è comunque rivolto verso la versione base del VE che è quella che dovrebbe avere maggiori chance per il passaggio da VCI a VE, sia per il prezzo e sia per le sue ideali caratteristiche di auto da città, che si presta maggiormente a questa migrazione.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

L'attività svolta per valutare la percentuale dei VCI convertibili in VE è preceduta da una descrizione del campione dei dati, e da una dettagliata analisi delle soste. Sono stati quindi selezionate le classi di VE da considerare per le valutazioni. Infine dopo la valutazione delle percentuali dei veicoli convertibili in VE si sono analizzati i nuovi carichi che verrebbero introdotti sulla rete elettrica.

### 2.1 Descrizione dei dati campione

Con l'avvento della tecnologia GPS, grazie alla quantità e qualità dei dati resi disponibili, si stanno sviluppando nuovi metodi di indagine del traffico, con numerose possibili ricadute sulle politiche di gestione del territorio. In particolare l'ENEA ha ottenuto alcuni campioni di dati dalla società Octo Telematics [ 3] che gestisce i dati provenienti da veicoli che, per fini assicurativi, montano a bordo un apparecchio GPS (clear box). Durante il viaggio, con una cadenza che, a seconda delle necessità, è collegata al tempo trascorso (30 s) o alla distanza percorsa (2 km), la clear box registra l'ora UTC (Coordinated Universal Time [ 4]) della registrazione, la posizione del veicolo, la velocità istantanea, la distanza percorsa dalla registrazione precedente e altri parametri. La popolazione di veicoli monitorata (chiamata in seguito "veicoli GPS") è abbastanza diffusa sul territorio nazionale; infatti ha una consistenza dell'ordine del 2-3 % della popolazione veicolare italiana ed è destinata ad aumentare.

In questo documento vengono utilizzati rilevamenti fatti nell'intero mese di Maggio 2011 in un rettangolo di circa 129 x 98 km<sup>2</sup> che circonda l'intera provincia di Roma, come mostrato in Figura 1.

I dati di origine, contenenti 106.985.577 registrazioni, sono stati oggetto di un'analisi preliminare per rimuovere le anomalie dovute a registrazioni incongruenti e per riadattare le registrazioni troncate in modo anomalo alla fine (o all'inizio) per via dell'attraversamento in uscita (o in ingresso) della zona monitorata.

Successivamente per ogni veicolo è stato determinato il luogo ed il comune di residenza in base alla sua sosta notturna più ricorrente.

Dopo l'analisi preliminare, si è visto che il database ristrutturato contiene informazioni su 116.700 veicoli. Di questi, 80.961 sono veicoli residenti in comuni interamente contenuti nell'area monitorata e quindi si può affermare che i dati utilizzati sono pari al 2,66% dei veicoli immatricolati. I rimanenti 35.739 veicoli sono quelli in transito, o visitatori occasionali, o appartenenti a comuni parzialmente compresi nell'area monitorata.

La natura dei dati fornita da Octo Telematics era stata concepita per dare una completa informazione *territoriale* fornendo tutte le registrazioni disponibili dei veicoli GPS in transito nell'area di Figura 1, sia essi residenti o meno sul territorio. Purtroppo per lo studio in oggetto era più utile avere le intere registrazioni del veicolo relative anche agli spostamenti al di fuori dell'area rettangolare, ma fino ad oggi è stato impossibile ottenere questo tipo di informazione.

Data l'elevato numero dei veicoli monitorati (per esempio nel comune di Roma sono 48.400 pari al 2,54% degli immatricolati), si è pensato di considerare un campione più omogeneo con i soli veicoli GPS residenti dentro il GRA (Grande Raccordo Anulare), costituito da 33.193 veicoli, il cui luogo di 'residenza' è rappresentato con un puntino rosso in Figura 1. L'omogeneità del campione è data dall'aver scelto veicoli i cui proprietari risiedono in centro-città e la loro residenza è caratterizzata dall'aver all'incirca la stessa distanza dal confine.

Purtroppo, questa selezione fatta, pur qualificando il campione, presenta informazioni incomplete quando un veicolo sconfinava dal territorio monitorato.

Pertanto dai 33.193 veicoli considerati si sono selezionati quei veicoli che non sconfinano mai dalla zona monitorata ottenendo così il campione di riferimento (CdR) costituito da 13.399 veicoli, caratterizzati dall'aver un'informazione completa sugli spostamenti del veicolo.

Si fa presente che, per determinate ragioni, non è stato possibile ottenere, per i dati disponibili, le caratteristiche del veicolo come al esempio la cilindrata, il peso o altro.



Figura 1 – I dati forniti da Octo Telematics sono tutti quelli registrati nella mappa rettangolare che circonda la Provincia di Roma. I punti in rosso rappresentano il domicilio dei 33.193 veicoli 'residenti' dentro il GRA.

## 2.2 Analisi delle soste

La diffusione del VE è molto legata alla sua ricarica e quindi ha una forte dipendenza dalle soste che devono essere di adeguata durata per consentire la sua ricarica. Poiché un veicolo raramente viene usato più di 2 ore al giorno è evidente che il rimanente tempo è in genere sufficiente per la ricarica. Comunque é

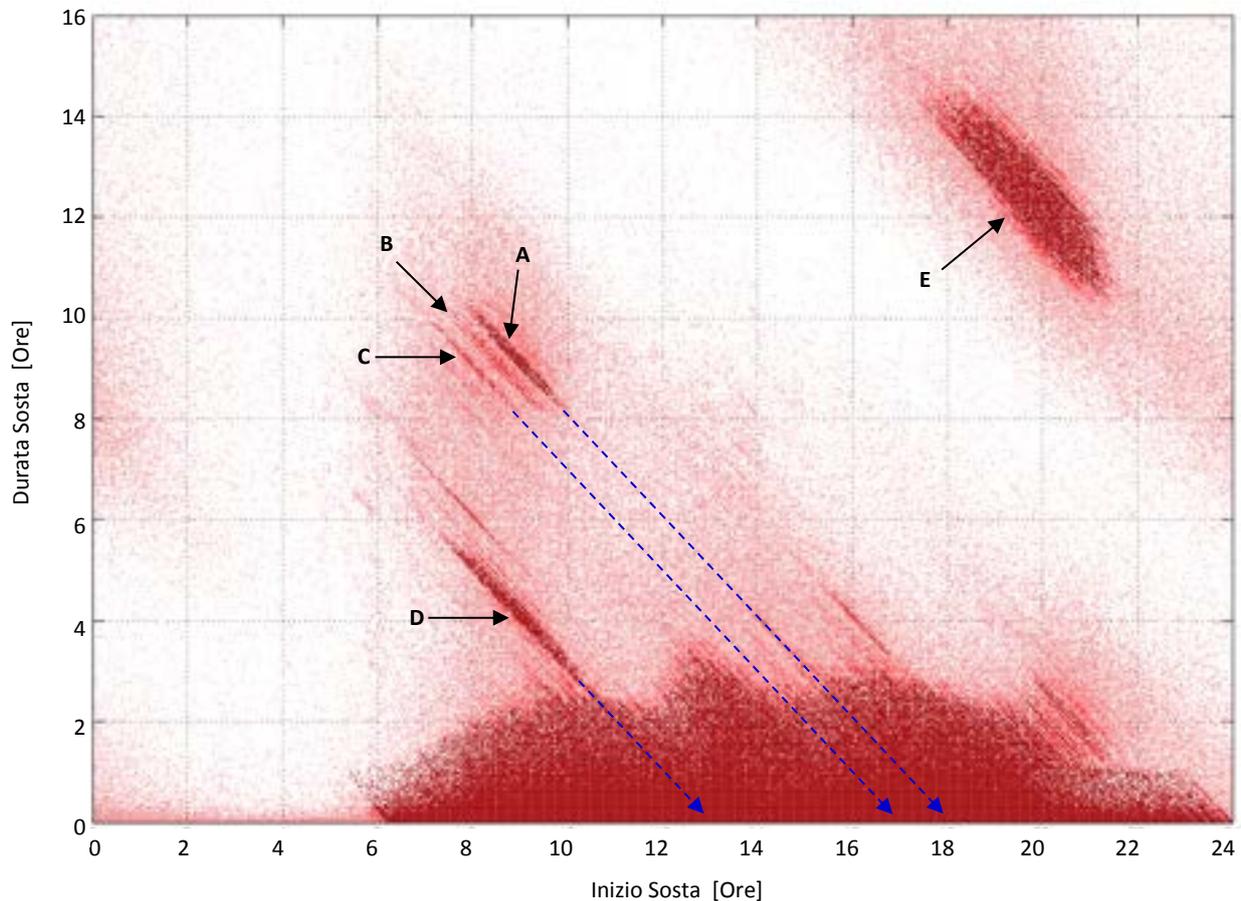
opportuno avere una conoscenza della natura delle soste, sulla loro durata ed in quali ore del giorno avvengono.

La Figura 2 sinteticamente illustra questi valori analizzati sui dati di tutti i veicoli del CdR, del giorno 4.5.2011. In particolare questo campione di riferimento, i cui veicoli non sconfinano mai, dalla mappa di Figura 1, dà informazioni complete su tutte le soste della giornata. Ogni punto della figura rappresenta una sosta con la sua durata in ordinata, e l'ora d'inizio in ascissa. Si osserva che diversi punti si concentrano in nuvole caratterizzate da una proiezione a  $-45^\circ$ , rispetto all'ascissa, mettendo in risalto che la sosta è condizionata dall'orario di ripresa del veicolo, indicata dalle rette tratteggiate.

In particolare la nuvola A rappresenta veicoli che, indipendentemente dall'orario di inizio sosta, tra le 8 e le 10, escono tutti intorno alle 18,30 come mostrato dalla retta tratteggiata. Analogamente le nuvole B e C sono veicoli che per le stesse ore di ingresso precedenti escono però alle 17 e alle 18. Queste nuvole rappresentano soste legate ad una intera giornata lavorativa.

Di diversa natura è la nuvola D che è legata ad attività della durata di mezza giornata che indipendentemente dall'inizio tra le 8-10, si concludono alle 13 (anche per le uscite dovute al pranzo)

Infine la nuvola E, di dimensioni maggiori delle altre appena descritte, rappresenta tutte le soste che iniziano in tarda serata per terminare la mattina successiva tra le 7 e le 9 (soste a casa).



**Figura 2- I punti rappresentati con ora inizio sosta, in ascissa, e durata sosta, in ordinata, mostrano tutte le soste effettuate dai veicoli del CdR del comune di Roma nel giorno 3.5.2011.**

**Le nuvole A,B,C rappresentano le soste mattutine che terminano tra le 17 e le 18,30 mentre le soste mattutine della nuvola D terminano alle ore 13. La grande nuvola E infine rappresenta le soste effettuate in tarda serata che terminano la mattina successiva**

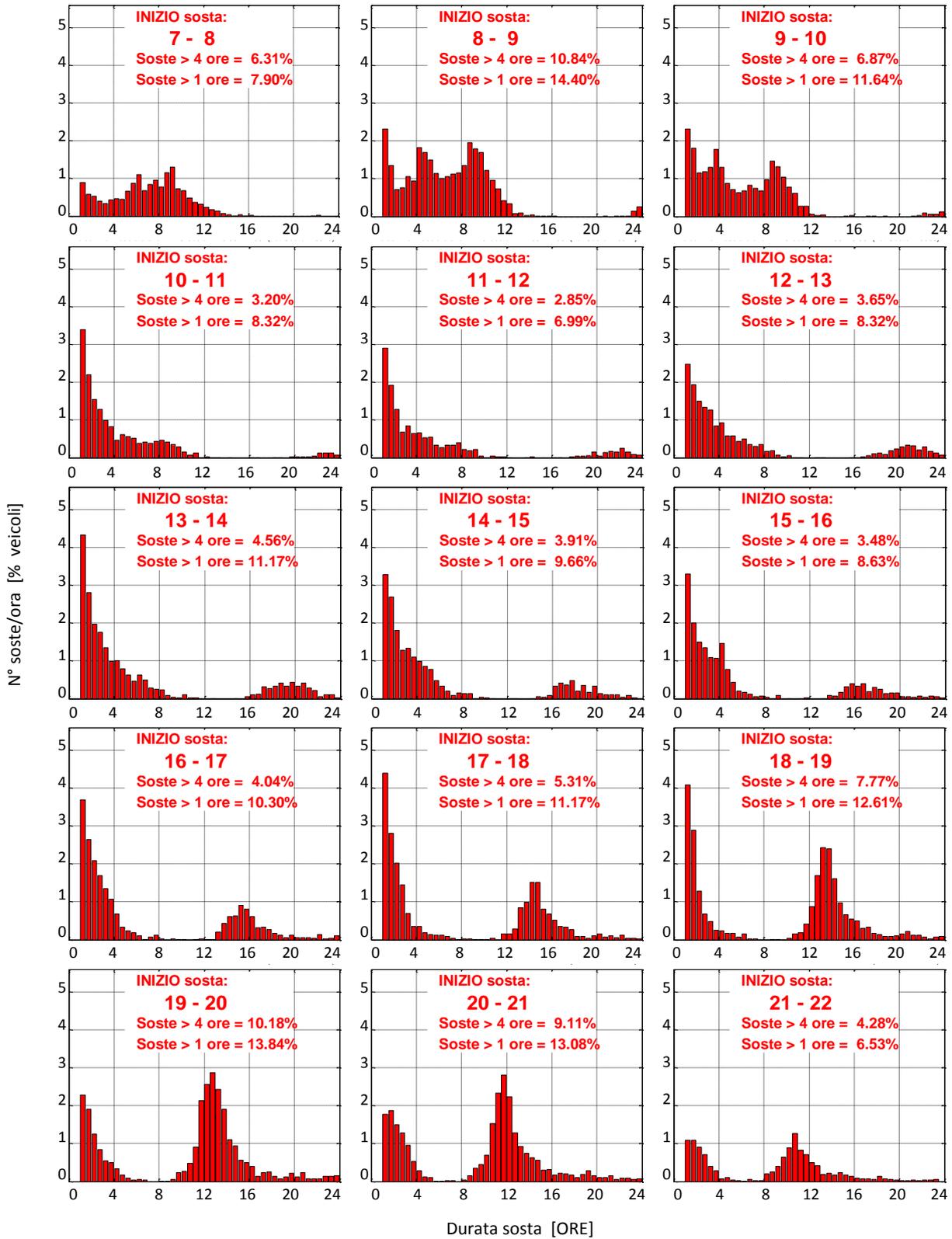


Figura 3 – Gli istogrammi fatti per il periodo di 1 ora, dalle 7 alle 22, mostrano la distribuzione della durata soste nelle diverse ore del giorno. I valori delle ordinate sono riportati come % del numero dei veicoli del CdR. Sono escluse le soste di durata inferiore ad 1 ora.

Per perfezionare la conoscenza delle soste, nella Figura 3, sono riportati gli istogrammi della durata soste, con osservazioni per periodi di 1 ora, fatti dalle 7 alle 22, per evidenziare la loro distribuzione nelle diverse ore del giorno. In ascissa è riportata la durate delle soste.

La larghezza delle barre usate per il campionamento delle soste è di ½ ora. In ordinata, per non far dipendere il numero dei conteggi del campionamento dalla larghezza della barra usata, si è riportato, al posto del loro valore, quello per unità di ora. In sintesi le soste misurate nella mezz'ora, sono state moltiplicate x 2 per averli come N°soste/ora. Sempre in ordinata, infine, si è riportato il valore come percentuale sul numero totale dei veicoli del CdR.

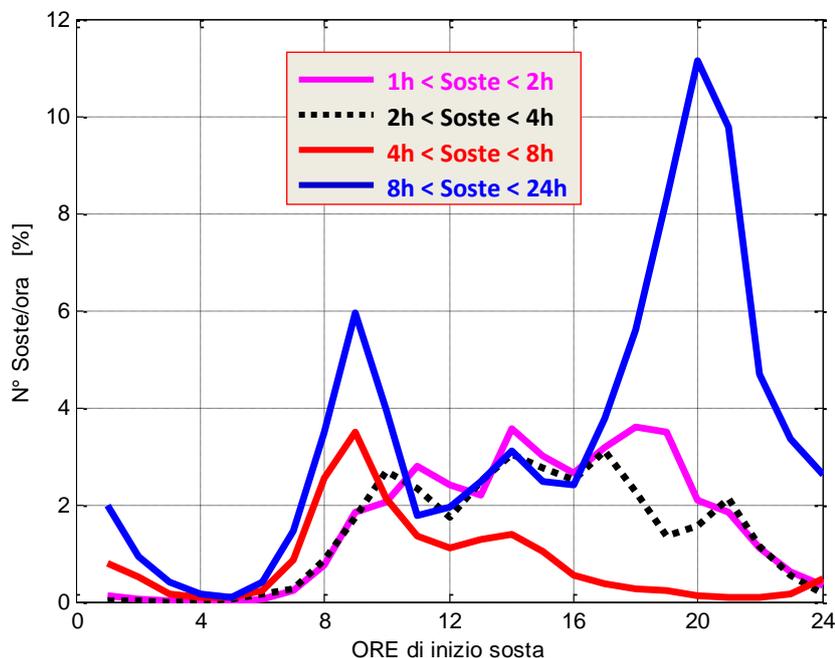
Si fa presente che nella giornata esaminata solo il 69,3% del totale dei veicoli del campione è in circolazione.

Nei prime 3 istogrammi, tra le ore 7 e le 10, si osserva una consistente presenza si soste di durata tra le 4 e le 10 ore che vanno sparendo nel resto della giornata. Dal primo pomeriggio dopo le 16 fino alle 22 cominciano ad apparire, in crescendo, soste con durata superiore alle 10 ore.

Nella Figura 3 sono state escluse le soste di durata inferiore ad 1 ora, in quanto eccessivamente numerose e poco utili per le ricariche.

Dai valori sovrascritti in rosso sugli istogrammi si ricava che dalle 7 alle 22 le soste > di 4 ore sono l'86,4 % e quelle > di 1 ora sono il 154,4 %. Tenendo conto che i veicoli circolanti sono stati il 69,3 %, in quest'intervallo di ore ci sono state più di due soste a veicolo > di 1 ora ed almeno una > di 4 ore.

Quanto appena detto risulta ancor più chiaro osservando la Figura 4 che raccoglie le soste da 1 ora a 24 ore, date dalla figura precedente, e le suddivide nelle 4 fasce riportate nella leggenda. Anche in questa figura i valori del N° di soste, in ordinata, sono riportati in valore percentuale sul totale dei veicoli del campione di riferimento



**Figura 4 – Distribuzione della durata soste suddivise nelle 4 fasce riportate in leggenda**

Si vede che la fascia più rappresentativa è quella data dalla curva azzurra, delle soste della fascia di maggior durata da 4 ad 8 ore.

Infine considerando tutte le soste, comprese anche quelle di pochi minuti, si riscontra che sono 51.416 e che riferendosi ai 13.399 veicoli del campione rappresentano 3,84 soste a veicolo.

Se però le soste vengono riferite ai soli veicoli circolanti si hanno 5,54 soste a veicolo.

### 2.3 Classi di veicoli elettrici considerate

Per poter affermare che un VCI può essere trasformato in VE, oltre alla conoscenza delle percorrenze giornaliere fatte dal veicolo durante diversi giorni di osservazione (nel nostro caso 1 mese), occorre conoscere l'autonomia del veicolo.

Per non limitare lo studio al solo VE di base, con modesta autonomia, si sono considerate diverse classi di VE. Sono state adottate le sei diverse classi di VE considerate in [ 5] e riportate nella prima colonna di Tabella 1: . Nelle colonne 2-4 sono mostrati il peso, la potenza e la capacità della batteria di ciascuna classe di veicolo. Nelle ultime 2 colonne, in base ai consumi ricavati dai drive test [ 6], si sono ricavati i consumi elettrici e l'autonomia del veicolo.

Per evitare il danneggiamento della batteria normalmente viene usata tra il 20% ed il 95% della sua capacità nominale. Lo stato di ricarica (SOC) tra questi 2 valori è gestito in modo automatico invisibili al guidatore.

Tra le varie classi di veicoli considerati quella più idonea al passaggio da VCI a VE è certamente quella delle city car, indicata in tabella come "small size car", per via del loro uso, fatto di piccoli spostamenti.

Altrettanto interessante è la classe "Light quadri-cycle" che, per via del loro basso peso, hanno un ridotto consumo che consente un'autonomia di almeno 180 km. Purtroppo però possono trasportare solo 1 o 2 persone.

Alle due precedenti classi si aggiungono quella delle "medium size car" in versione normale e a prestazioni più elevate che in pratica corrispondono ai segmenti C e D.

Infine l'elenco si conclude con le 2 classi: "Large size car" e "Large size SUV". Queste ultime 2 classi corrispondono in pratica al segmento E, e vengono inserite per completezza visto per che garantire la loro potenza hanno necessità di batterie con elevata capacità. Inoltre hanno consumi maggiorati, che contrastano con la filosofia del VE che punta al rispetto ambientale.

**Tabella 1: Elenco delle diverse classi di VE usati nelle analisi con peso, potenza e capacità batteria nelle colonne 2-4. Nelle ultime 2 colonne si riporta il consumo, derivato dai drive test, e l'autonomia.**

Classe Veicolo	Peso [Kg]	Potenza [kW]	Capacità Batteria <sup>1</sup> [Wh]	Consumo elettrico [Wh/km] ( [km/kWh] )	Autonomia [km]
Light quadri-cycle	450	13	13	70 (14,3)	186
Small size car	1.080	47	16	186 (5,4)	86
Medium size car	1.521	80	24	210 (4,8)	114
Medium size car (high performance)	1.815	125	32	205 (4,9)	156
Large size car	2.108	310	85	236 (4,2)	360
Large size SUV	2.600	300	85	265 (3,8)	321

<sup>1</sup> Capacità utile

### 2.4 Analisi preliminare. Percorrenza in elettrico senza ricariche intermedie nel giorno più critico del mese.

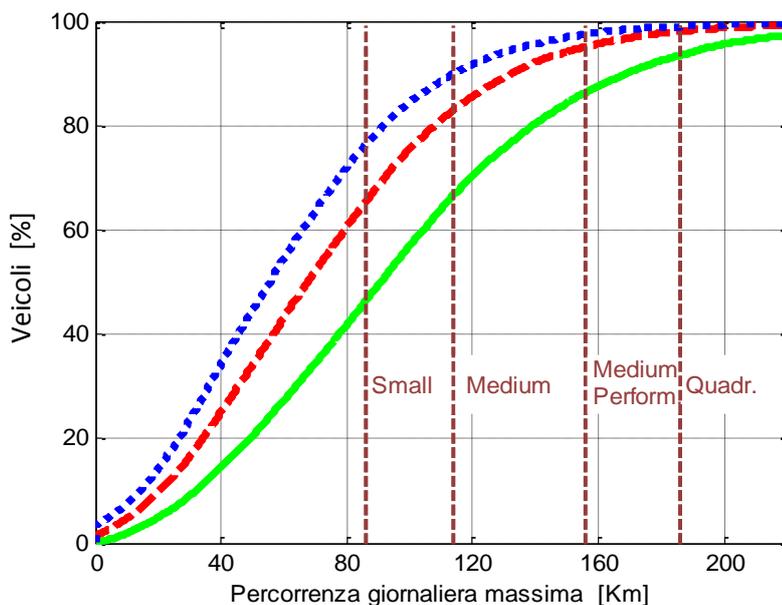
Prima di procedere con analisi più complesse si verifica, sui 13.399 veicoli del CdR, quanti sono quelli in grado di circolare in modalità elettrica senza necessità di ricariche intermedie [ 7].

Per questa semplice analisi basta selezionare, per ogni veicolo, il solo giorno più critico del mese cioè quello con la sua massima percorrenza giornaliera. Quindi basta verificare se in questa giornata il veicolo è

in grado di circolare fino al termine partendo con la batteria carica. I risultati sono rappresentati dalla curva continua verde di Figura 5. Da qui si vede che il 46,5% dei veicoli, ha la percorrenza giornaliera più critica inferiore agli 86 Km, che è l'autonomia di un VE-small, mentre il 93,4% rimane sempre al disotto dei 186 km, che è l'autonomia di un quadriciclo elettrico.

Nell'arco del mese può verificarsi che il veicolo percorra più km di quelli consentiti al VE. In questi casi, poiché il possesso di un VE può modificare le modalità del suo utilizzo, si ipotizza che per una, o 2 volte nel mese, si possa rinunciare al proprio veicolo, ricorrendo ad altre soluzioni di trasporto.

Pertanto, sempre in Figura 5, si riporta la curva rossa tratteggiata rappresentante, per tutti i veicoli, la 2° percorrenza giornaliera più lunga del mese, mentre la curva azzurra punteggiata, rappresenta la 3° percorrenza più lunga del mese



**Figura 5 – La curva verde mostra la percentuale del CdR che nel mese non supera mai una percorrenza giornaliera. Lo stesso risultato, escludendo per ogni veicolo il giorno con la massima percorrenza, è mostrato dalla curva rossa mentre in azzurro si ha la curva escludendo i 2 giorni con la max percorrenza. Le linee verticali rappresentano l'autonomia delle varie classi di veicoli elettrici.**

Le stesse informazioni della figura precedente sono riportate in Figura 6 in modo più chiaro.

Nell'istogramma è mostrata la percentuale dei veicoli convertibili in elettrici, per ciascuna classe prevista. Nella prima colonna, di ciascuna classe, è riportata la percentuale dei VE che nell'arco del mese, con la sola ricarica notturna, sono sempre in grado di soddisfare la percorrenza richiesta.

Nella seconda colonna è riportate la stessa percentuale fatta però con la rinuncia, di un solo giorno nel mese, del proprio veicolo (quello in cui la percorrenza giornaliera supera l'autonomia del veicolo). Infine le percentuali con 2 rinunce nel mese sono riportate nella terza colonna.

Come si vede dall'istogramma le percentuali dei possibili VE, con la sola ricarica notturna, sono abbastanza elevate anche nel caso dei veicoli a minor autonomia, la cui percentuale minima supera il 46 %.

Nell'analisi successiva, ipotizzando la possibilità di ricariche intermedie, è facile prevedere che queste percentuali sono destinate ad aumentare

## 2.5 Determinazione della percentuale di veicoli campione che potrebbero essere sostituiti da veicoli elettrici

Nell'analisi che segue per consentire una maggior presenza di VE si è considerata la possibilità di ricaricare il veicolo durante le soste giornaliere. La modalità di ricarica adottata dipende solo dalla durata sosta. In pratica il veicolo viene ricaricato solo se la sosta supera una certa durata.

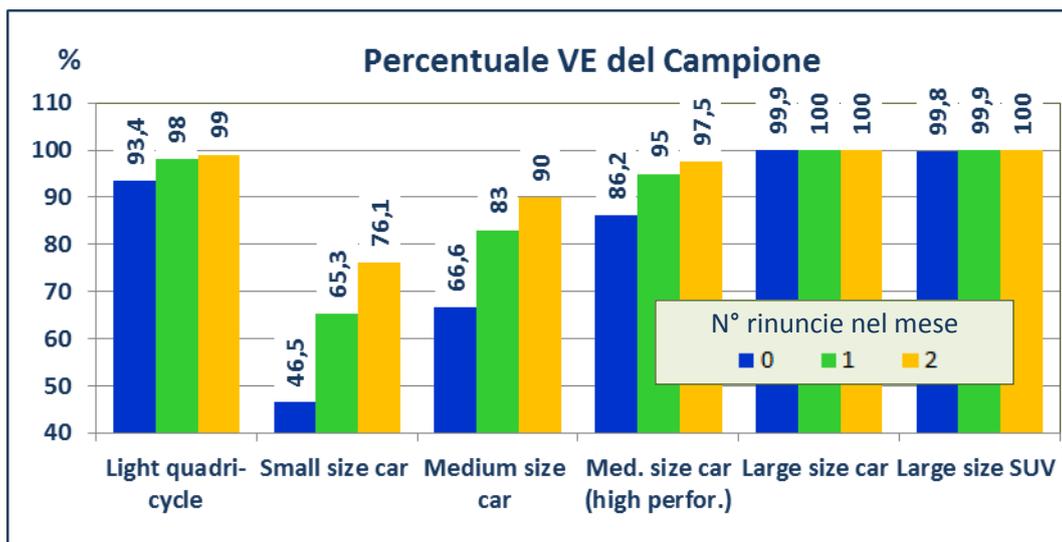


Figura 6 – Percentuali di VE che possono circolare senza necessità di ricarica intermedia. Nella 1° colonna quelli senza nessuna rinuncia nel mese, nella 2° colonna quelli con 1 rinuncia e nella 3° quelli con 2 rinuncia.

Si sono scelte 4 durate sosta al disopra delle quali il veicolo verrà ricaricato. La scelta fatta è di 8, 4, 2 ed 1 ora.

Tendenzialmente se il modello di ricarica prevede una durata sosta più elevata, richiederà sistemi di ricarica meno distribuiti, per esempio presso la propria abitazione o sul posto di lavoro. Diversamente ricariche per durate sosta minori richiederanno sistemi di ricarica più distribuiti sul territorio come ad esempio supermercati, centri commerciali, ospedali, stazioni ecc.

Nell’analisi che segue si è verificato se, per ogni sosta dei dati in possesso, esistono le condizioni per la ricarica del veicolo. In caso affermativo questa viene fatta da rete con una potenza lorda di 3 Kw ma con una utile di 2,7 kw per un periodo pari alla durata della sosta o fino al raggiungimento della completa ricarica.

Inoltre, in tutte le soste, se il veicolo non è sotto-carica, viene considerata una scarica della batteria pari al 10% della sua capacità nel tempo di 30 giorni.

A conclusione di queste elaborazioni si considera non idoneo alla trasformazione in elettrico il veicolo che anche per 1 sola volta nel mese non è in grado di completare il proprio percorso perché la sua batteria ha esaurito la carica.

La sintesi dei dati più interessanti, di quelli ottenuti, è riportata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e verranno illustrati meglio in seguito mediante grafici ed istogrammi.

Nella prima colonna di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è riportata la classe dei 6 veicoli elettrici considerati e nella colonna alla loro destra è riportato il valore della sosta minima per la ricarica.

Nella terza colonna si riporta la percentuale dei veicoli del campione che possono essere convertiti in elettrico mentre nella colonna successiva si riporta la percentuale di km che verrebbero percorsi dai VE calcolata sull’intero mese. Per completare le informazioni sulle percorrenze nella colonna 5 si riporta la percorrenza mensile dei VE e nella colonna accanto la percorrenza media mensile dei VE.

Infine nelle colonne 7 e 8 si riporta rispettivamente l’assorbimento totale da rete e quello medio a VE. Infine nell’ultima colonna è riportato il numero di ricariche complete che mediamente il VE effettua nel mese.

Da questa tabella quello che appare immediatamente è che i VE “Large” possono sostituire quasi totalmente i veicoli dell’attuale parco veicolare. La percentuale di queste sostituzioni per i VE “Small” può invece variare dal 50% all’80% a seconda della modalità di ricarica adottata. Mentre la percentuale dei km percorsi, per questa classe di veicoli, scende ulteriormente variando solo dal 26% al 63% rispettivamente.

Il numero delle presenze dei VE e le relative percorrenze orarie sono meglio mostrate nei loro valori istantanei in Figura 7. Nei 4 grafici di sinistra, per ognuna delle 4 soste minime previste per la ricarica, e per

il periodo di osservazione della prima settimana di maggio, riportato in ascissa, è rappresentato il numero di presenze di veicoli che possono essere trasformati in VE.

**Tabella 2: Per tutte le classi di VE (col.1) ed in base alla sosta minima prevista (col.2) sono riportate le % del numero di VE (col.3) e dei km percorsi (col.4), rispetto al CdR. Seguono la percorrenza mensile: totale di tutti i VE (col.5) e media a VE (col.6) oltre all'assorbimento di elettricità da rete: totale (col.7) e medio a VE (col.8). Nell'ultima colonna sono riportate il N° di ricariche medie al mese per veicolo.**

Classe Veicolo	Sosta minima di ricarica [Ore]	[%] del camp.		Percorrenza mensile		Assorb. elet.mensile da rete		Ricaric/mese Medie a veicolo [N°]
		N° veic Elettr.	Km percorsi in elett.	Totale [Km x 10 <sup>6</sup> ]	Media <sup>(1)</sup> a Veicolo [Km]	Totale [GWh]	Media <sup>(1)</sup> a Veicolo [KWh]	
Light quadri-cycle	8	91,0	79,7	7,8	638	0,59	49	3,4
	4	95,6	89,2	8,7	679	0,67	52	3,6
	2	97,9	94,2	9,18	700	0,71	54	3,8
	1	99,0	96,7	9,4	711	0,73	55	3,8
Small size car	8	47,5	26,2	2,5	401	0,51	80	4,5
	4	58,3	37,9	3,7	473	0,75	96	5,4
	2	70,5	52,8	5,14	545	1,05	111	6,2
	1	77,7	62,7	6,1	587	1,25	120	6,8
Medium size car	8	66,0	45,2	4,4	498	1,00	113	4,2
	4	76,5	59,7	5,8	568	1,33	130	4,9
	2	84,6	71,5	6,97	615	1,61	142	5,3
	1	88,8	78,3	7,6	642	1,77	149	5,6
Medium size car (high perfor.)	8	83,9	68,4	6,7	593	1,48	132	3,7
	4	90,5	80,3	7,8	646	1,76	145	4,1
	2	94,3	87,3	8,51	673	1,92	152	4,3
	1	96,1	90,8	8,8	687	2,01	156	4,4
Large size car	8	99,1	96,5	9,4	708	2,45	185	2,0
	4	99,7	98,5	9,6	719	2,53	189	2,0
	2	99,8	98,9	9,65	721	2,56	191	2,0
	1	99,9	99,2	9,7	723	2,58	193	2,0
Tot. Veicoli camp.		100	100	9,75	728	-	-	-

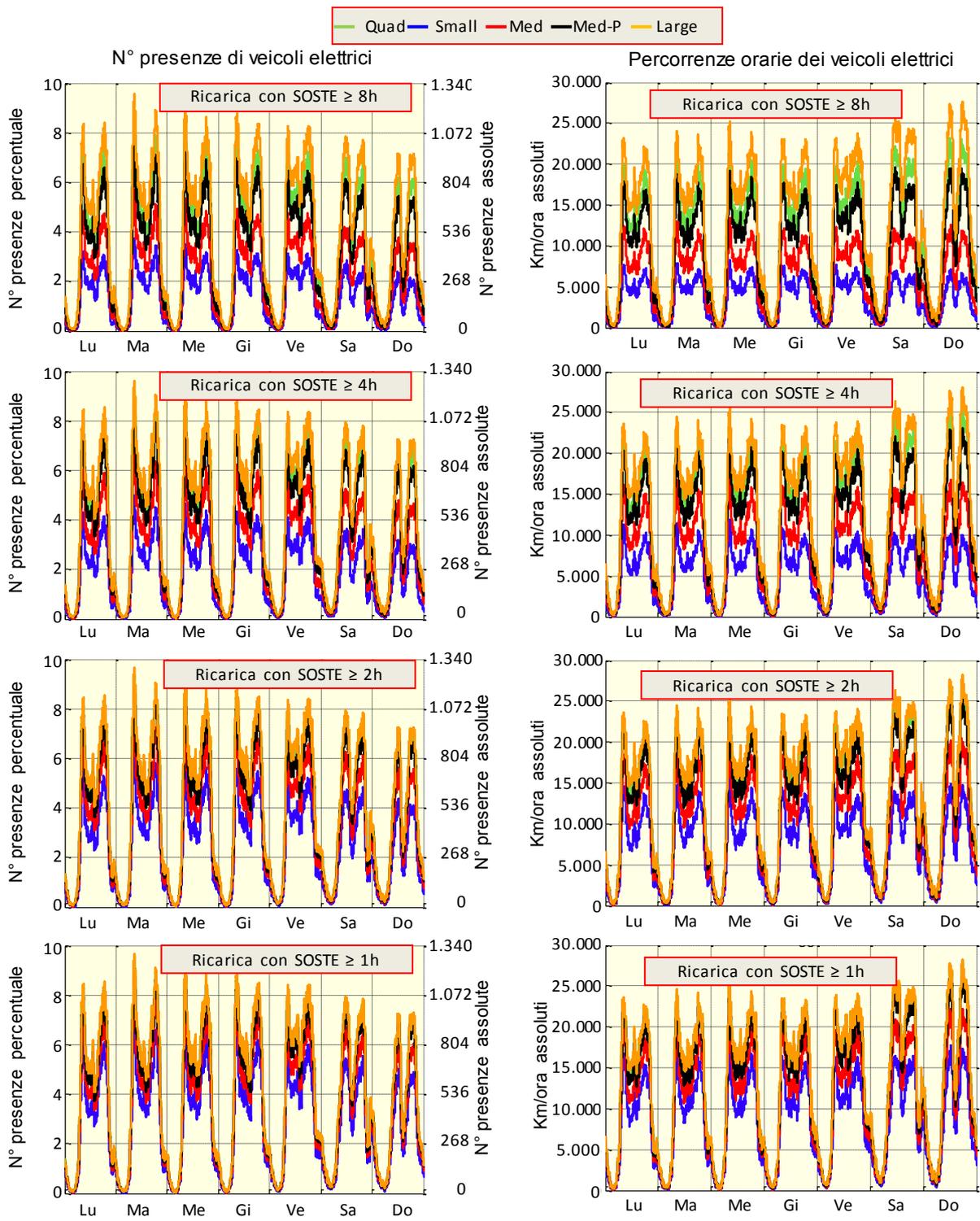
<sup>(1)</sup> la media non è fatta su tutti i 13.399 veicoli campione ma solo su quelli che possono essere convertiti in VE

Le ordinate sono riportate in percentuali del CdR, a sinistra, ed in valore assoluto, a destra.

Ognuna delle curve rappresenta una delle 5 classi di VE, riportate in leggenda. Non è stato rappresentato il "SUV" perché le sue curve sono quasi identiche a quelle dei veicoli "Large".

Non si sono riportate anche le curve delle presenze di tutti i veicoli del CdR, necessarie per fare un confronto, perché le loro curve sono molto simile a quella dei "Large", come si può facilmente dedurre da

**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**



**Figura 7 – Nella prima settimana di maggio, per le 5 classi di VE, riportate in leggenda, nei grafici a sx sono rappresentati il numero di possibili presenze di VE per ognuna delle 4 soste minime previste per la ricarica. A dx sono rappresentate le relative percorrenze orarie. Le ordinate sono riportate a sx con valori percentuali e a dx in assoluto.**

Come si vede dai grafici il N° delle presenze è quasi indipendente dal tipo di ricarica per i VE “Large” e “Quadri-cycle”, per via dell’elevata autonomia. Invece per i veicoli ad autonomia ridotta, come gli “Small” il numero di presenze tende a raddoppiare passando da ricarica con soste di durata > 8 ore a quella con soste di durata > 1 ora.

Il numero di presenze dei VE, distribuita nel tempo, di Figura 7, non consente di valutare la percentuale dei veicoli convertibili in elettrico. Ciò è più chiaramente mostrato nell’istogramma di sinistra di Figura 8.

Nei 4 grafici di destra, della stessa figura, sono riportate le percorrenze chilometriche orarie di tutti i veicoli del campione. I valori sono riportati in ordinata solo in valore assoluto.

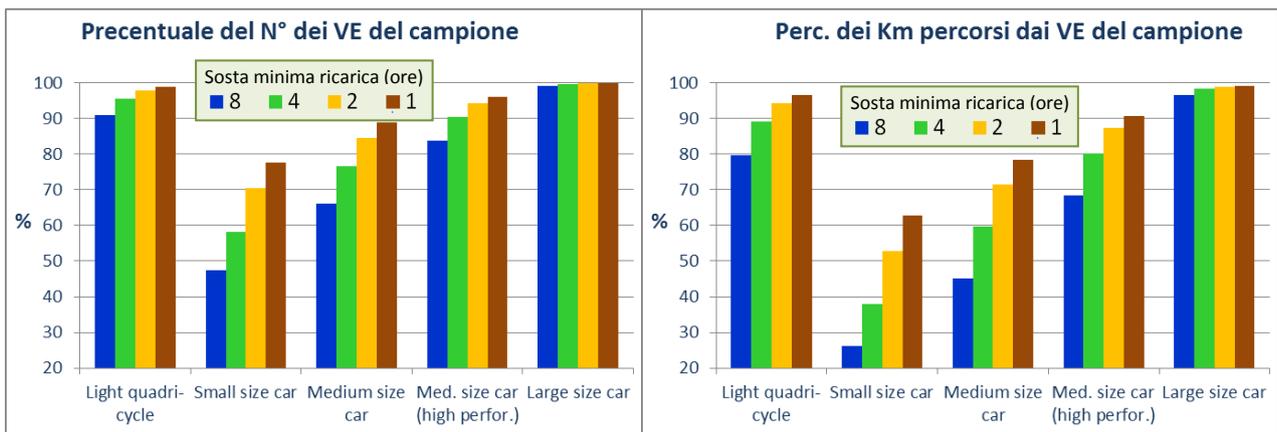
Come in precedenza non è stato rappresentato il “SUV” perché le sue curve si sovrappongono a quelle dei veicoli “Large”.

Anche qui si vede dai grafici che per i VE “Large” e “Quadri-cycle”, il N° dei chilometri orari percorsi è quasi indipendente dal tipo di ricarica mentre per i veicoli ad autonomia ridotta, come gli “Small” tende a raddoppiare passando da ricarica con soste da 8 ore a quelli con soste da 1 ora.

Per avere la percorrenza giornaliera o settimanale o quella mensile basta integrare i valori del grafico per il tempo desiderato.

Anche questi grafici non rendono bene l’idea di quanto può essere l’incidenza del VE anche in termini di Km percorsi. Ciò è però più chiaramente mostrato nell’istogramma di destra, di Figura 8.

Dal confronto dei 2 istogrammi si vede che le percentuali sul N° dei Km percorsi sono minori delle percentuali sui N° dei veicoli come era da prevedersi. Infatti ciò è dovuto alla minor autonomia dei VE con conseguenti percorrenze inferiori alla media ed in particolare nella classe “Small”.



**Figura 8 - L’istogramma di sx mostra, in base al tipo di ricarica specificata in leggenda, quale è la % del campione convertibile per ciascuna classe di VE. L’istogramma di dx mostra la % di km che i VE percorrerebbero rispetto a quelli dell’intero campione per ciascuna classe di VE.**

Si è voluto riportare questi 2 istogrammi perché quello di sinistra è di interesse più per i venditori di VE mentre quello di destra interessa più agli ambientalisti.

Una volta individuati i veicoli convertibili in VE e conoscendo il loro utilizzo è possibile dedurre quale sarà l’assorbimento sulla rete.

I 4 grafici di Figura 9, per ognuna delle 4 modalità di ricarica, rappresentano le 5 curve della potenza istantanea richiesta alla rete per le diverse classi di VE, riportate in leggenda.

In ascissa è riportato l’asse dei tempi della prima settimana di maggio 2011 mentre in ordinata si riporta la potenza istantanea richiesta alla rete. Nelle ordinate di destra è riportato il valor assoluto in MW, relativo a tutta la popolazione dei possibili VE, mentre a sinistra è riportato la potenza media, per singolo veicolo, espressa in W. In questo caso la normalizzazione per ogni curva è fatta sempre con il numero totale di veicoli del CdR per avere un valore normalizzato di immediato utilizzo anche con campioni di diverse dimensioni.

Quello che si nota è che la ricarica con soste di durata > 1 ora ridistribuisce meglio la potenza, rispetto alle ricariche per soste > 8 ore, livellando i picchi di potenza.

In particolare nelle classi dei veicoli “Large” (curva arancione) e “Quadri-cycle” (curva verde) è visibile un abbassamento dei picchi di potenza, per via dei Km che rimangono sostanzialmente invariati, con il cambiamento del tipo di ricarica.

Invece per i veicoli “Small” (curva blu) la ricarica con soste di durata > 1 ora rispetto a quella > 8 ore porta ad un notevole aumento delle percorrenze che pur con una più livellata distribuzione conduce ad un discreto aumento dei picchi di potenza.

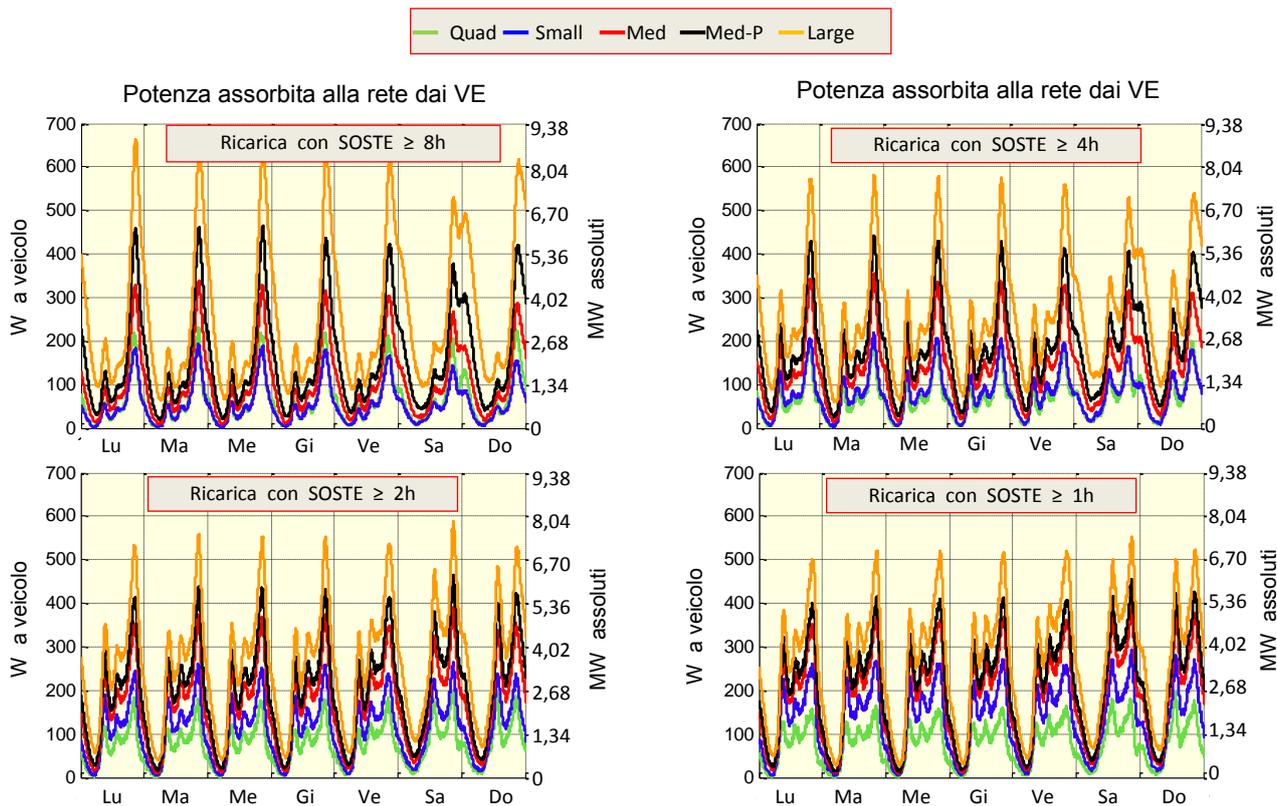


Figura 9 – Nella prima settimana di maggio, per le 5 classi di VE, riportate in legenda, nei 4 grafici sono riportate le potenze assorbite dalla rete elettrica per alimentare i VE con le percorrenze ottenute dai VE sottoposti alle 4 differenti soste di ricarica considerate.

## 2.6 Variazione dell’assorbimento di rete in funzione della durata sosta, per la ricarica, e della classe di veicolo elettrico

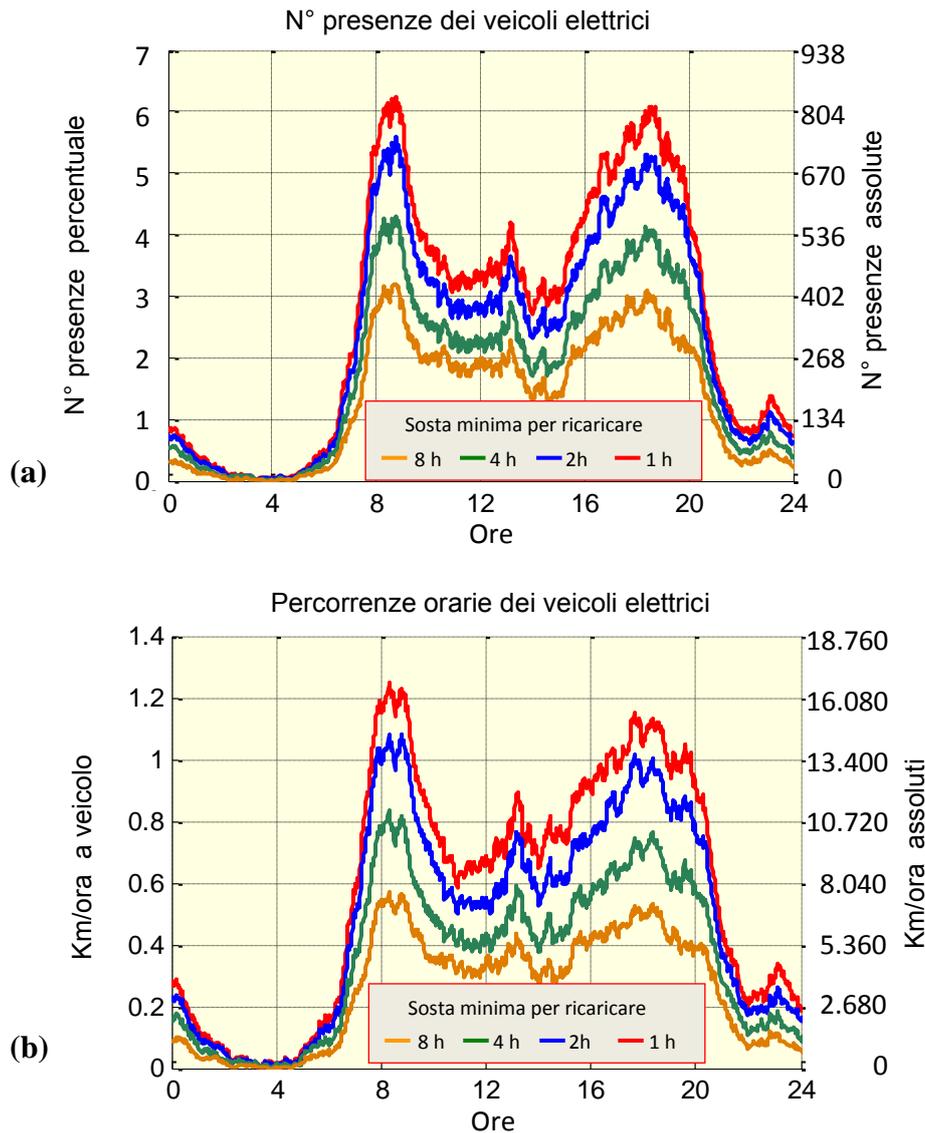
In questo capitolo si vuole approfondire la variazione della distribuzione di potenza, assorbita da rete elettrica, cambiando ai VE la modalità di ricarica, tra le 4 considerate.

Il fenomeno è stato analizzato più in dettaglio nel giorno di lunedì 2 maggio per la sole classi “Small” e “Large” che presentano i due comportamenti estremi.

La

Figura 10 mostra il numero di presenze dei VE nei vari istanti della giornata fatto per i veicoli “Small”. Ciascuna curva rappresenta uno dei 4 tipi di ricarica. Si vede, dal grafico (a), che passando da ricariche con soste di durata > 1 ora (curva arancione) a quella con soste > 8 ore (curva rossa) il numero di presenze dei VE tende quasi al raddoppio.

Nel grafico successivo (b), che riporta i km orari, percorsi nei vari istanti della giornata, mostra che passando da ricariche con soste di durata > 1 ora (curva arancione) a quella di ricariche con soste > 8 ore (curva rossa) le percorrenze orarie aumentano poco più del doppio.



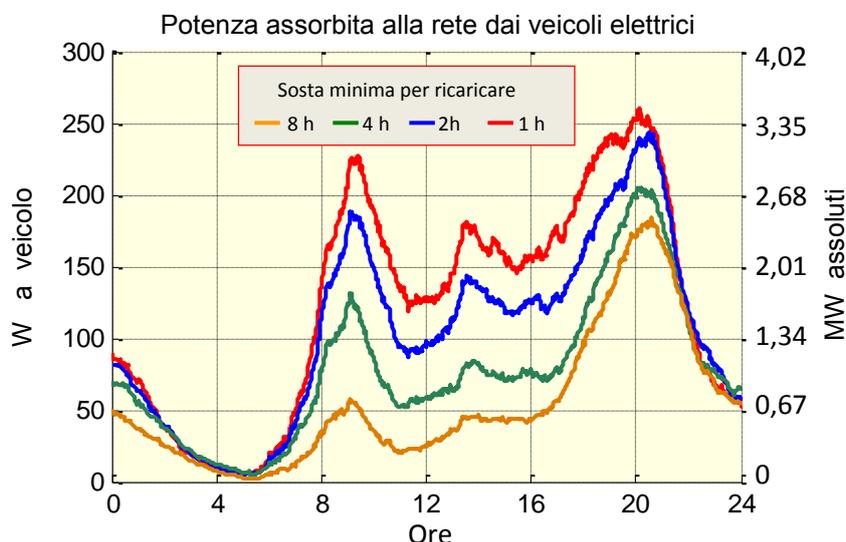
**Figura 10 – Presenze e percorrenze orarie dei possibili VE di classe ‘Small’ ottenibili dal campione di riferimento nella giornata di lunedì 2 maggio. Le diverse curve dipendono dalla strategia di ricarica determinata dalla scelta della sosta minima per effettuare la ricarica del VE.**

Da questi comportamenti dei VE così riscontrati si vuole vedere quali sono le curve di carico sulla rete elettrica durante la giornata. Ciò è chiaramente mostrato in Figura 11 dove è riportata la potenza assorbita in rete, durante le 24 ore giornaliere. A destra i valori sono riportati in assoluto e a sinistra sono normalizzati a veicolo, (prendendo sempre a riferimento il N° dei veicoli del CdR).

Appare subito evidente la differenza tra le 2 curve estreme. La curva rossa (ricariche a partire da 1 ora) presenta un assorbimento circa doppio rispetto alla curva arancione (ricariche a partire da 8 ora) per via delle percorrenze che all'incirca raddoppiano.

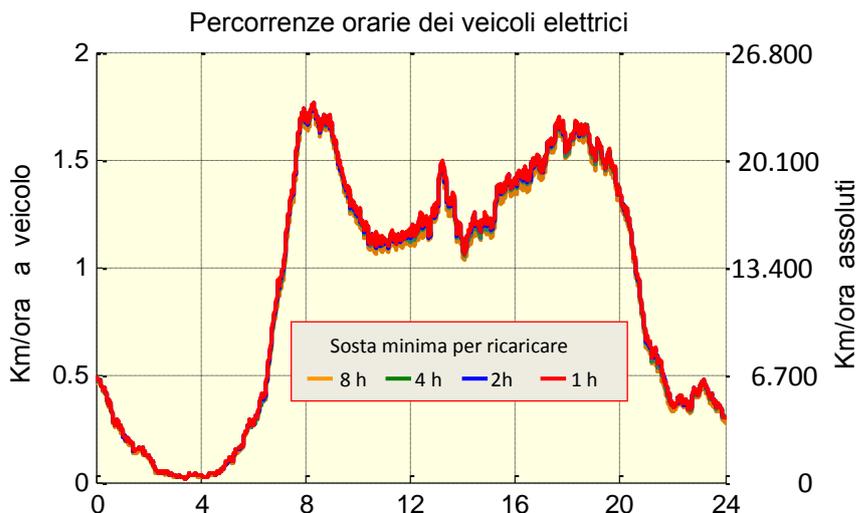
**La curva arancione, inoltre, mostra un notevole assorbimento in tarda serata che coincide con il termine di utilizzo del veicolo a fine giornata. Invece la curva rossa tende a seguire l'andamento delle percorrenze orarie di**

Figura 10 (b) con un ritardo di 1 o 2 ore, come si deduce confrontando i picchi delle 2 figure. La curva rossa, inoltre, presenta un assorbimento più livellato rispetto alla curva arancione il cui assorbimento si concentra prevalentemente nel picco delle ore 20. Infatti basta osservare che la curva arancione, rispetto a quella rossa, ha una riduzione del solo 28 % alle 20 di sera mentre si riduce del quasi 80 % alle 9 di mattina.



**Figura 11 – Carico assorbito dalla rete elettrica per alimentare i VE di classe ‘Small’ con le percorrenze del grafico precedente con le curve dipendenti dalla diversa strategia di ricarica del VE**

La stessa analisi fatta sul veicolo “Small” è ripetuta anche sul quello “Large”. In questo caso si parte dal grafico, di Figura 12, delle percorrenze orarie dei veicoli dove si riscontra che, indipendentemente dalla ricarica, le percorrenze rimangono sostanzialmente invariate per via della elevata autonomia di 360 km di questa classe di veicoli. In questo caso il grafico delle presenze si è omesso perché le curve erano ancora più simili.



**Figura 12 – Percorrenze orarie dei possibili VE di classe ‘Large’ ottenibili dal campione di riferimento. Le diverse curve dipendenti dalla strategia di ricarica in questo caso sono quasi identiche.**

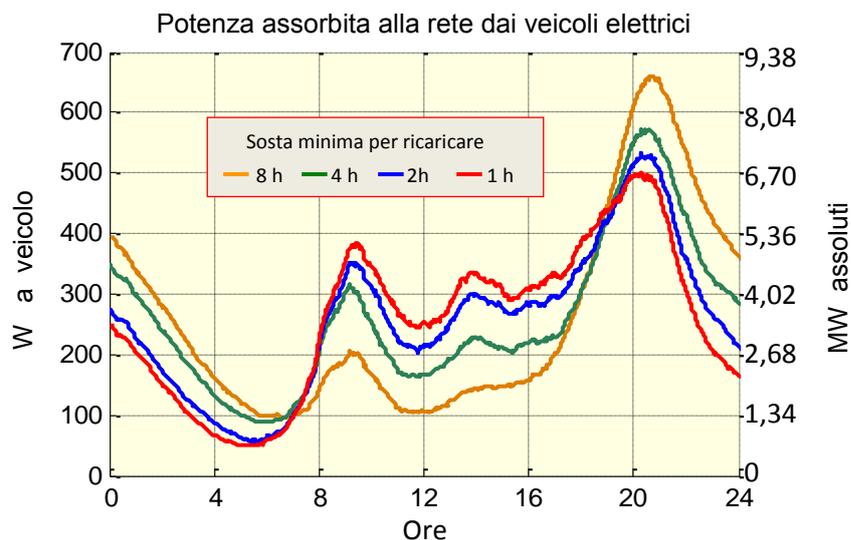
La curva rossa, della percorrenza oraria di questa figura, osservando la scala normalizzata delle ordinate a sx, sx, risulta maggiorata di quasi un terzo rispetto alla analoga curva rossa di

Figura 10.

La scala normalizzata aiuta a capire meglio l’utilizzo che viene fatto del veicolo, infatti l’integrale delle percorrenze orarie di questa figura rappresenta i Km/giorno che mediamente questa classe di veicoli percorre. Ad esempio integrando la curva rossa, di Figura 12, si ottengono 23,7 Km/giorno (8.670 Km/anno) contro i 19.57 Km/giorno (7.040 Km/anno) ottenuti per l’analoga curva di

Figura 10.

Passando ora alle curve degli assorbimenti, mostrata in Figura 13 per questa classe di veicoli, si vedono 4 diverse distribuzioni, caratterizzate dall’aver lo stesso assorbimento di energia, per via delle stesse percorrenze per ciascuna delle 4 modalità di ricarica.



**Figura 13 – Carico assorbito dalla rete elettrica per alimentare i VE di classe ‘Large’ con le percorrenze del grafico precedente con le curve dipendenti dalla diversa strategia di ricarica del VE**

L’andamento delle curve di assorbimento è molto simile a quella dei veicoli “Small” con la curva arancione (8 ore) che concentra l’assorbimento verso le 20 di sera, mentre la curva rossa (1 ora) tende a seguire l’andamento delle percorrenze orarie, anche se un po’ meno accentuato del caso precedente.

### 3 Conclusioni

I risultati ottenuti, per quanto accurati, sono caratterizzati da una visione parziale del fenomeno poiché invece della intera popolazione interna al GRA, che si voleva esaminare, se ne è considerata solo il 40%. Sulla rimanente popolazione nulla si può dire a priori. Certamente la percentuale non considerata tendenzialmente ha una percorrenza maggiore di quella esaminata ma ciò non esclude, anche su questa percentuale, la presenza di un consistente numero di VCI convertibili in VE. Basti pensare a tutti i fenomeni di pendolarismo da e verso Roma con zone appena esterne all'area monitorata. Inoltre, si sono scartati diversi veicoli, che pur facendo molti km, potevano viaggiare in elettrico grazie a ricariche intermedie ma che purtroppo, uscendo dai confini, anche per un solo giorno, non consentono di avere le corrette informazioni per l'analisi.

Volendo fare delle ipotesi sulla percentuale dei veicoli non considerata, per quanto verosimili è comunque necessaria una loro verifica. Sarebbe quindi auspicabile la possibilità di ottenere database con informazioni più mirate sul veicolo che sul territorio.

Il lavoro svolto sulle 4 modalità di ricarica considerate mette comunque in risalto le potenzialità di questi dati. In particolare è possibile analizzare altre modalità di ricarica in presenza di richieste più particolareggiate, magari condizionate da strategie per distribuire meglio i carichi di rete.

Inoltre nel lavoro svolto si è considerata solo la ricarica lenta. Da quanto mostrato appare necessario considerare anche sistemi di ricarica veloce. Infatti la ricarica veloce porterebbe anche le classi "Small" e "Medium" a percentuali di conversione prossime al 100%. Inoltre la ricarica veloce è quasi necessaria per i veicoli "Large" in quanto una loro ricarica completa da 80 Kwh durerebbe 1 giorno e mezzo.

## Parte Seconda

### 4 Sommario

Le analisi di seguito riportate costituiscono un complemento alle attività svolte dal Centro di ricerca per i Trasporti e la Logistica (CTL) dell'Università La Sapienza di Roma circa la fattibilità tecnico-economica dell'elettrificazione del Trasporto Pubblico Locale (TPL).

In particolare le analisi si focalizzano sul confronto delle prestazioni energetiche ed ambientali dei veicoli adibiti al servizio di TPL in area urbana e sulle caratteristiche dei sistemi di ricarica rapida che potrebbero essere impiegati in caso di elettrificazione del servizio.

Il confronto dei consumi e delle emissioni dei bus urbani in funzione del tipo di motorizzazione ha portato a concludere che, mentre il consumo alle ruote di un bus elettrico è circa un quarto di un diesel, sull'intero ciclo di vita della fonte energetica il rapporto fra i due consumi si attesta intorno al 40%; tuttavia, nel caso del motore a combustione interna l'energia consumata è tutta di origine fossile mentre nel caso dell'elettrico incide una quota parte di energia rinnovabile che attualmente, per il parco elettrico italiano, è pari al 28% circa ed è destinata ad aumentare rapidamente, grazie alle politiche comunitarie e nazionali in tal senso.

Con riferimento ai costi operativi dell'energia, ogni km percorso da un bus alimentato a gasolio costa alle aziende di trasporto pubblico poco più di 36 eurocent/km, nel caso dei bus elettrici tale valore scenderebbe a 16 eurocent, con un risparmio monetario di circa 55%.

Riguardo agli aspetti ambientali (sempre riferiti a veicoli di medie dimensioni), un bus diesel produce circa 0,9 g CO<sub>2</sub>/km (sul ciclo di vita del combustibile), a fronte di poco più di 0,65 g CO<sub>2</sub>/km di un veicolo alimentato elettricamente. Considerando anche le altre sostanze nocive più importanti (particolato e ossidi di azoto), i costi esterni legate alle emissioni in atmosfera, calcolati utilizzando coefficienti di costo riconosciuti a livello europeo, risultano pari a circa 6 eurocent/km per il veicolo diesel e a circa 0,25 eurocent/km per quello elettrico, avendo computato l'incidenza della fase di produzione e distribuzione dell'energia.

Passando alla ricarica rapida per batterie agli ioni di Litio con supercapacitori, secondo studi pregressi è possibile ottenere tempi di ricarica variabili fra 40' a 185', se si prendono in considerazione valori di amperaggio di alimentazione rispettivamente pari a 3C e 0,5C, dove C è la capacità della batteria; i corrispondenti rendimenti oscillano fra 0.88 e 0.96, mantenendosi comunque su valori alquanto elevati.

Inoltre, impiegando valori di corrente e tensione molto elevati, con particolari dispositivi di contatto fra veicolo e rete di distribuzione dell'energia elettrica predisposti alle fermate è possibile effettuare la ricarica dei supercapacitori a bordo di un veicolo elettrico in pochi secondi (15'' circa), compatibili con i tempi di salita e discesa dei viaggiatori. Una tale soluzione permette di ridurre ulteriormente le capacità energetiche necessarie all'esercizio dei veicoli, anche se i costi di investimento salgono notevolmente a causa delle installazioni necessarie alle fermate.

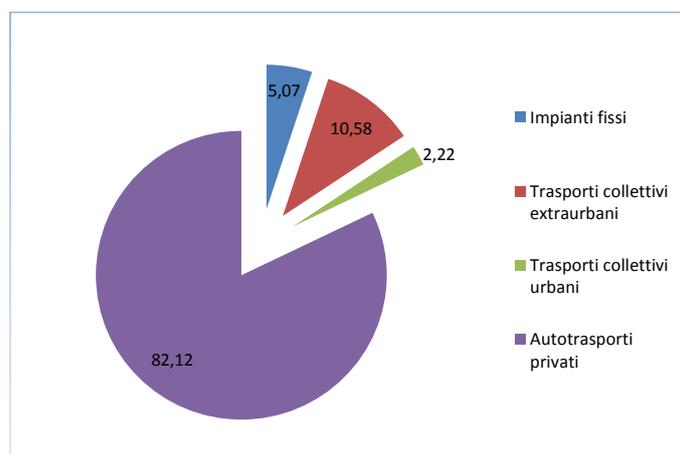
## 5 Introduzione

In questa seconda parte del presente report si riportano le analisi effettuate da ENEA a complemento delle attività svolte dal Centro sul Trasporto e la Logistica (CTL) dell'Università La Sapienza di Roma, relative alla fattibilità tecnico-economica dell'elettrificazione del Trasporto Pubblico Locale.

In particolare ENEA ha esaminato il quadro di insieme dell'ambito di indagine ed ha fornito al CTL alcuni dati di input necessari allo studio di fattibilità, più specificatamente la declinazione delle caratteristiche funzionali e prestazionali dei dispositivi di ricarica rapida dei veicoli elettrici adibiti al trasporto pubblico locale e il confronto energetico-ambientale dei bus per tipologia di alimentazione, tradotti in valore di costo (interno ed esterno).

## 6 Il Trasporto Pubblico Locale in Italia

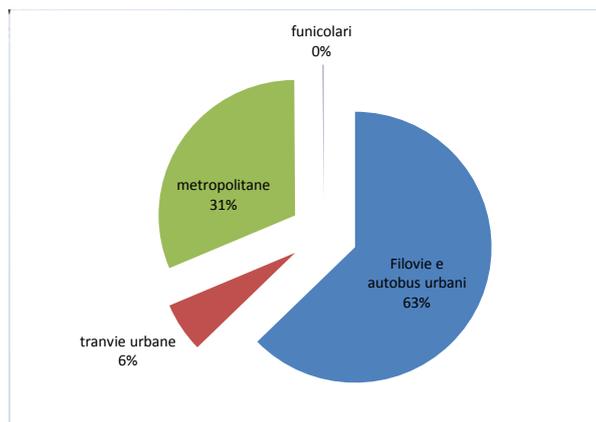
Nel 2011, il trasporto pubblico locale (urbano ed extraurbano) ha servito più del 16% della domanda di trasporto passeggeri terrestri che ha avuto luogo in Italia. Le quote di domanda passeggeri sul totale dei passeggeri-km delle diverse modalità di trasporto sono riportate nella Figura 14 di seguito.



**Figura 14: Composizione modale del trasporto passeggeri terrestri in Italia 2011 (% su pax-km)**  
**Fonte dati: Conto nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti, ed. 2013**

Sotto il profilo socio-economico, il settore del Trasporto Pubblico Locale (TPL) coinvolge circa 1070 imprese pubbliche e private che operano in ambito urbano (43%) ed extraurbano (57%); il fatturato complessivo si aggira sui 10 miliardi di Euro annui e il numero di addetti è di circa 116.500 persone.

Il servizio di trasporto Pubblico viene effettuato prevalentemente con autobus (63%), anche in ambito urbano (Figura 15); infatti solo in alcune città sono presenti infrastrutture per il trasporto a guida vincolata ed in particolare delle linee di metropolitana sono state realizzate solo in sei città, con una netta prevalenza delle reti di Milano, Roma e Napoli.



**Figura 15: Composizione modale del TPL urbano, 2011 (% su pax-km)**  
**Fonte dati: Conto nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti, ed. 2013**

Il parco autobus nazionale adibito al TPL urbano è costituito da 18.676 autobus (anno 2011)<sup>1</sup>. L'anzianità media della flotta è alquanto elevata, pari a circa 13 anni; circa il 60% degli autobus ha più di 10 anni; tale situazione produce inevitabilmente maggiori consumi di carburante ed elevati costi di manutenzione.

Eppure, tutti i documenti di indirizzo strategico del settore trasporti indicano il trasferimento modale da trasporto individuale a trasporto collettivo come uno dei principali obiettivi da perseguire nel medio termine per migliorare il livello di sostenibilità della mobilità urbana. Per tale ragione, è importante che nel futuro sia garantito un adeguato livello delle performance del servizio, a partire da quelle energetiche ed ambientali.

In generale, la conversione verso un maggiore impiego di fonti energetiche non convenzionali è più facilmente perseguibile nel caso del trasporto collettivo piuttosto che in quello privato, in quanto è più facile pianificare e controllare il rinnovo della flotta in tal senso e garantire l'approvvigionamento dell'energia. E' necessario però investire in innovazione tecnologica, al contrario, negli ultimi anni si è registrata una flessione nell'allocatione delle risorse pubbliche destinate al settore, che si sono viste tagliare drasticamente i fondi anche per la gestione ordinaria.

### 6.1 Aspetti energetici ed ambientali

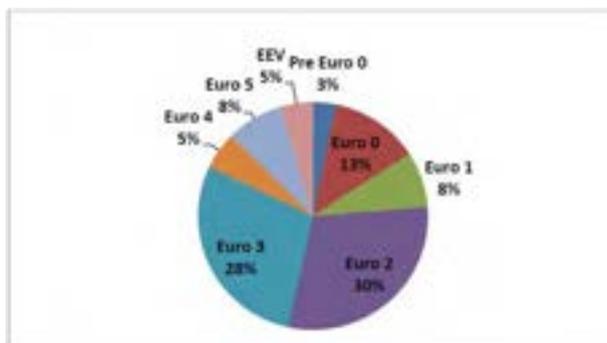
I consumi energetici totali per la trazione del trasporto pubblico su gomma, stimati da ENEA<sup>2</sup>, sono pari a circa 0,5 Mtep, una quota marginale dei consumi del trasporto passeggeri nazionale ma non trascurabile in termini di costi aziendali e della collettività, specie in un momento in cui l'attenzione verso tutti i margini di contenimento delle spese si fa sempre più pressante. Non a caso negli ultimi anni diverse aziende si sono dotate di un sistema gestionale per monitorare i propri consumi e quindi mettere in atto piani per il miglioramento dell'efficienza energetica, anche grazie alla possibilità di accedere agli incentivi statali (titoli di Efficienza Energetica) destinati all'impiego di tecnologie riconosciute di risparmio energetico (specie nel settore civile).

L'Associazione nazionale delle aziende di Trasporto pubblico locale (ASSTRA) ed Hermes nel 2011 hanno realizzato un'indagine sull'Efficienza energetica nel Trasporto Pubblico Locale", che ha visto coinvolte 41 aziende di trasporto pubblico locale. La ricerca era finalizzata a conoscere le iniziative che le Aziende di trasporto stanno adottando per ridurre i propri consumi energetici. Dall'indagine effettuata risulta che i principali interventi che le aziende ritengono strategicamente opportuno intraprendere in fase di esercizio ai fini della riduzione dei consumi, risultano essere nell'ordine: la manutenzione delle infrastrutture lineari, l'ammodernamento della flotta con l'acquisto di mezzi elettrici e filobus, il rinnovo del materiale rotabile, la formazione del personale sull'economy drive.

<sup>1</sup> Dati Conto Nazionale Trasporti 2011-2012

<sup>2</sup> Su dati ISPRA e CNIT 2010-2011

Secondo le stime di ISPRA (Inventario nazionale dei consumi e delle emissioni del trasporto su strada), i bus impiegati nel servizio urbano incidono solo per il 2% sui consumi della mobilità urbana ma emettono circa il 6% delle emissioni totali di ossidi di azoto, a causa del diffuso impiego della motorizzazione diesel e alla elevata anzianità del parco, che si riflette sulla composizione della flotta per standard emissivo: i veicoli di standard inferiore o uguale ad EUROIII rappresentano più dell'80% del totale, come mostrato nella seguente Figura 16.



**Figura 16: Composizione della flotta di autobus urbani in Italia nel 2010 per standard emissive**  
(Fonte: ASSTRA & Hermes, 2011)

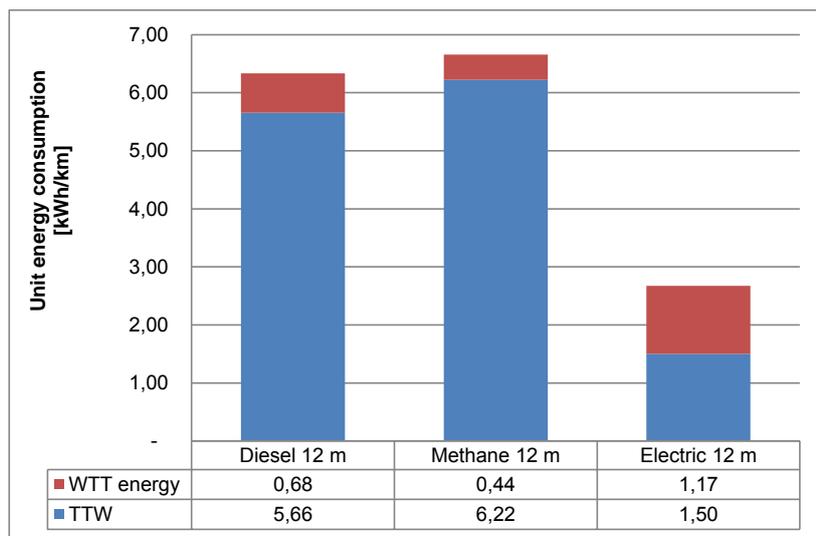
Tuttavia, si registra nel tempo una sempre maggiore penetrazione di bus a metano ed elettrici; questi ultimi nel 2010 rappresentavano circa il 2% del parco, mentre erano solo 1% nel 2006 (Tabella 3).

**Tabella 3: Composizione della flotta di autobus urbani in Italia per tipo di motorizzazione, 2006 – 2010**  
(Source: ASSTRA & Hermes, 2011)

	2006	2007	2008	2009	2010
Diesel	89.68	88.62	88.4	87.93	87.63
Methane	6.82	8.37	8.77	9.22	9.53
LPG	0.21	0.39	0.36	0.37	0.23
Hybrid	1.24	0.74	0.66	0.66	0.57
Electric	0.98	1.11	1.18	1.18	1.79
Others	1.07	0.77	0.63	0.65	0.24

Questi dati mostrano che, a dispetto della scarsità di risorse impegnate, il processo di rinnovo della flotta si è orientato verso tecnologie alternative al motore alimentazione diesel, ancor prima dell'adozione in Italia della Direttiva comunitaria 33/2009, secondo cui l'acquisto di veicoli per flotte pubbliche deve essere supportato da un'analisi costi/benefici comparativa fra le diverse opzioni tecnologiche che tenga in considerazione anche i costi energetici ed ambientali lungo tutto il ciclo di vita del veicolo e delle fonte energetica relativa.

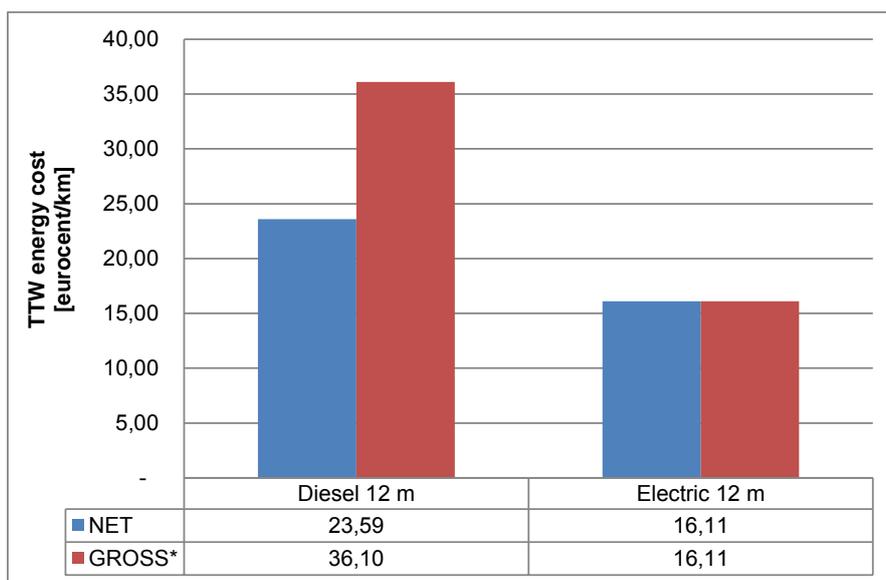
Come mostrato nel grafico seguente, i bus alimentati elettricamente hanno consumi specifici alle ruote molto più bassi (circa un quarto) di quelli che montano motori a combustione interna (diesel o a metano).



**Figura 17: Consumo specifico caratteristico di bus urbani per tipo di motorizzazione Tank-to-wheel (TTW) e Well-to-Tank (WTT) (Fonte dati: ENEA)**

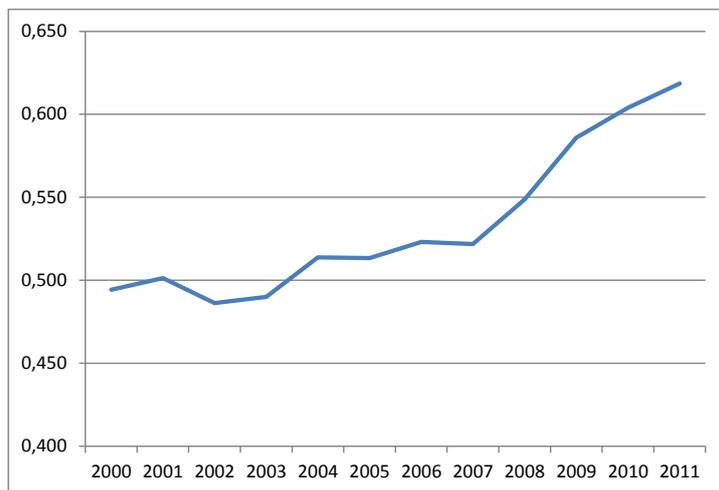
Infatti l'efficienza energetica di un motore elettrico raggiunge valori intorno a 80-90%, contro il 25% (al massimo) dei motori convenzionali. D'altro canto, però, la produzione di energia elettrica comporta maggiori perdite di quanto non ne comporti la produzione dei combustibili fossili; infatti, mentre il ciclo di estrazione, raffinazione e distribuzione del diesel e del metano incide, rispettivamente, per circa il 12% e per il 7% sull'energia consumata alle ruote, la produzione e distribuzione dell'energia elettrica comporta invece un dispendio energetico pari a circa l'80% del consumo al punto d'uso (nella media del parco elettrico italiano al 2011, comprese le perdite di rete in fase di distribuzione). Ciononostante, tuttavia, i veicoli elettrici risultano complessivamente più efficienti di quelli a diesel o a metano.

Le migliori performances ambientali dei veicoli elettrici trovano un riscontro sui costi della bolletta energetica delle aziende di TPL, secondo quanto illustrato nel grafico seguente. Come si può osservare, anche al netto delle imposte il costo energetico di un veicolo elettrico è notevolmente inferiore a quello di un analogo diesel; la differenza si acuisce se sono considerati anche gli oneri fiscali.



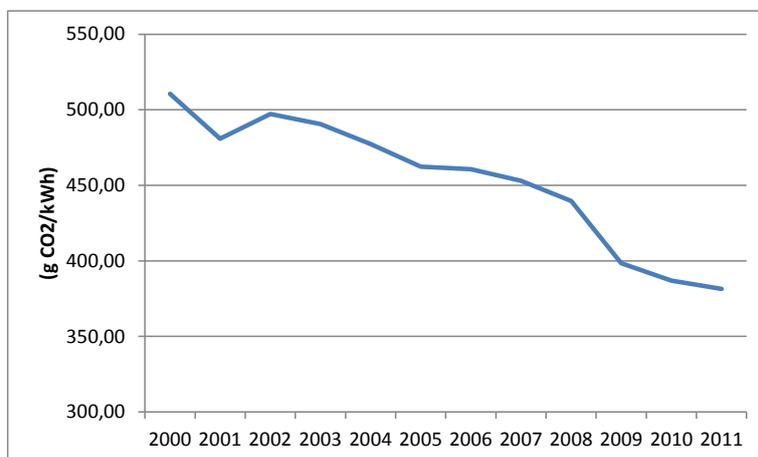
**Figura 18: Costi energetici di esercizio per bus urbani diesel ed elettrici, al netto ed al lordo delle accise (Fonte: elaborazione ENEA su dati vari)**

Considerato, inoltre, il rapido progresso dell'efficienza dei cicli di produzione dell'energia elettrica (cfr. figura seguente), c'è da attendersi che il vantaggio competitivo dei veicoli elettrici andrà aumentando in futuro, anche prescindendo dall'innovazione della tecnologia veicolare. Infine, la sempre maggiore penetrazione di fonti energetiche rinnovabili e pulite nella produzione elettrica nazionale ridurrà la dipendenza dal petrolio straniero e contribuirà a contenere gli impatti ambientali complessivi di ogni unità di percorrenza dei veicoli elettrici.



**Figura 19: Produttività netta del parco elettrico italiano, 2000 – 2011**  
(Fonte: elaborazione ENEA su dati ISPRA, 2012)

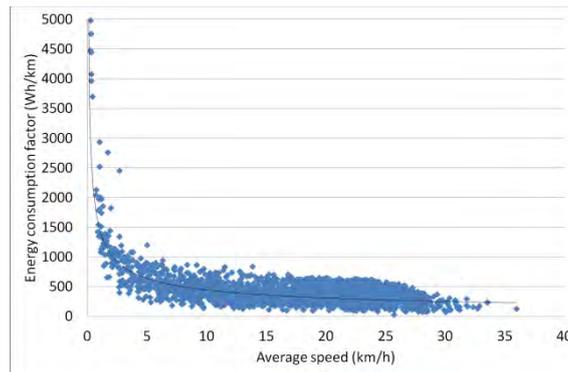
Si osservi, a tal proposito, come sia andando evolvendo l'emissione specifica media per la produzione di energia elettrica in Italia.



**Figura 20: Emissione specifica di anidride carbonica dei consumi di energia elettrica in Italia, 2000 – 2011**  
(Fonte: elaborazione ENEA su dati ISPRA, 2012)

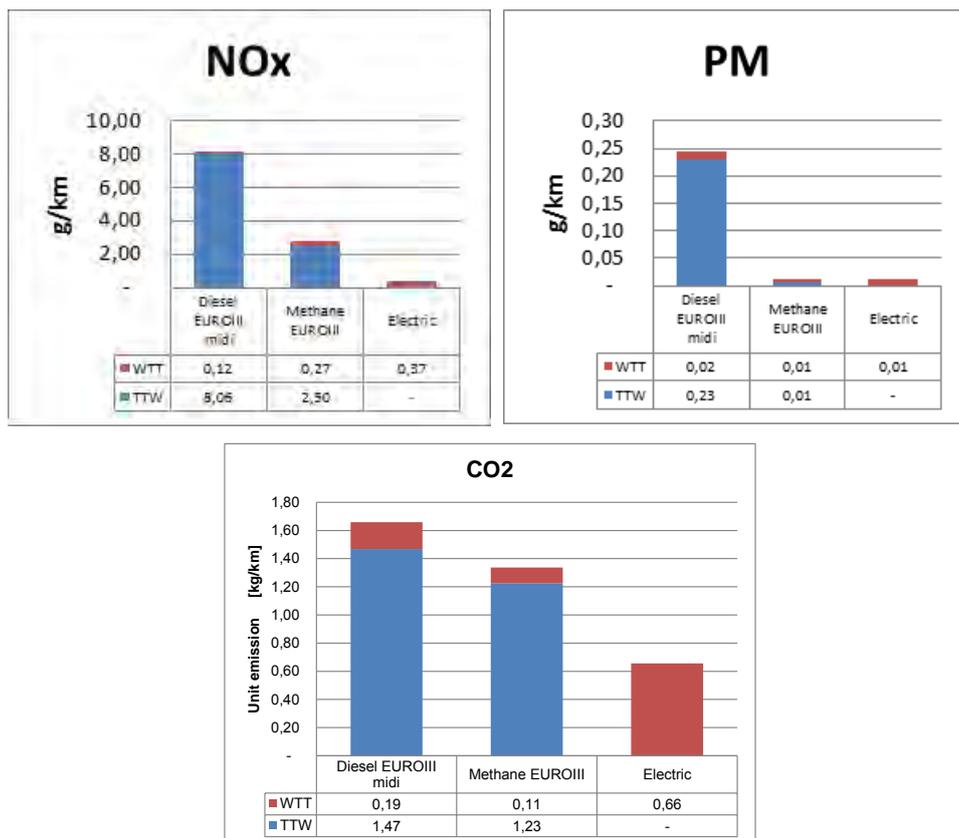
Entrando più nel dettaglio degli aspetti di consumo energetico dei veicoli al punto d'uso, si sottolinea che i consumi di un veicolo in generale, e particolarmente di un veicolo elettrico, è fortemente dipendente dalla velocità, della pendenza del percorso, dal carico a bordo e dall'assorbimento di dispositivi ausiliari, oltreché dal tipo di veicolo e dallo stile di guida del conducente.

Sperimentazioni condotte congiuntamente da ENEA e CTL hanno portato a definire una curva di consumo specifico in funzione della velocità per un Gulliver Tecnobus, ottenuta mediando i consumi del veicolo su un determinato percorso di modeste pendenze (vedi Figura 21).



**Figura 21: Consumo specifico in funzione della velocità media di viaggio**  
(Fonte dati: sperimentazione CTL-ENEA nell'ambito del progetto Smartcities)

Passando agli aspetti ambientali, i veicoli elettrici, come è noto, non emettono sostanze in atmosfera al punto d'uso. Anche considerando l'intero ciclo dell'energia, tuttavia, le loro emissioni complessive Well-to-Wheel sono inferiori alle omologhe nel caso di un veicolo di tipo convenzionale, come si vede dai valori mostrati nella Figura 22 seguente, relative alle emissioni di particolato (PM), ossidi di azoto (NOx) e anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) stimate sulla base di un insieme eterogeneo di dati ma sufficientemente indicativo ai fini del presente confronto<sup>3</sup>.



**Figura 22: Emissioni specifiche Tank-to-wheel e Well-to-Tank Urban dei bus urbani per tipo di motorizzazione**  
(Fonte: ENEA and ISPRA, 2011)

<sup>3</sup> In particolare, le emissioni al punto d'uso del bus diesel sono state ricavate dall'Inventario Nazionale dei Consumi e delle Emissioni del Trasporto su Strada dell'ISPRA per l'anno 2010, le omologhe del bus a metano sono state estrapolate dalle precedenti applicando opportuni coefficienti di riduzione. Riguardo alle emissioni upstream si è fatto riferimento, per il diesel ed il metano, a dati di Federmetano mentre per le emissioni della produzione di energia elettrica sono stati utilizzati dati di ISPRA.

Dalle stime effettuate, le emissioni complessive di NOx di un bus elettrico sono meno del 5% di quelle di un bus diesel e inferiori al 15% di quelle di un bus a metano; considerando che i costi esterni specifici delle emissioni di ossidi di azoto sono simili per le emissioni *upstream* e per quelle *downstream*, se ne ricava che i rapporti dei costi esterni dovuti all'NOx sono analoghi a quelli già espressi per le relative emissioni.

Anche nel caso del particolato, le emissioni complessive di un bus elettrico sono molto inferiori a quelle di un diesel; inoltre, mentre le emissioni del diesel si concentrano al punto d'uso, dove più elevata è la sensibilità ambientale e quindi il danno prodotto, nel caso dell'elettrico le emissioni si verificano unicamente nella fase di produzione dell'energia elettrica, in ambiti meno sensibili e quindi con meno danni ambientali. Infatti, secondo il Manuale Europeo sui costi esterni legati ai danni all'ambiente ed alla salute, in Italia una tonnellata di PM10 emessa in ambito urbano comporta mediamente 48.000 euro di danno (150.000 in caso di area metropolitana); la stessa tonnellata emessa in aree edificate esterne produce 27.100 euro di costi esterni e solo 6.700 euro per emissioni in aree industriali (valori riferiti all'anno 2000). Applicando questi valori alle emissioni specifiche dei bus viste in precedenza, si verifica che il costo esterno a km di un bus diesel è molte decine di volte più alto di quello di un bus elettrico.

Riguardo alle emissioni di anidride carbonica, le differenze fra le diverse tipologie di veicolo non sono così evidenti come nel caso del NOx e del PM, anche se il processo di decarbonizzazione della produzione elettrica in Italia (vedi Figura 20) sta gradualmente approfondendo il gap, a favore dei veicoli a batteria.

Il confronto delle diverse motorizzazioni in termini di costi esterni complessivi (per le sole categorie di emissioni precedentemente analizzate) mette in grande evidenza le migliori performance ambientali dei veicoli a batteria rispetto a quelli alimentati da combustibili fossili: infatti, se nel caso di autobus a diesel il costo esterno a km raggiunge quasi i 6 centesimi di euro, nel caso di un bus elettrico lo stesso costo si attesta a 0,25 centesimi di euro! Il bus a metano si colloca in una posizione intermedia fra questi due estremi.

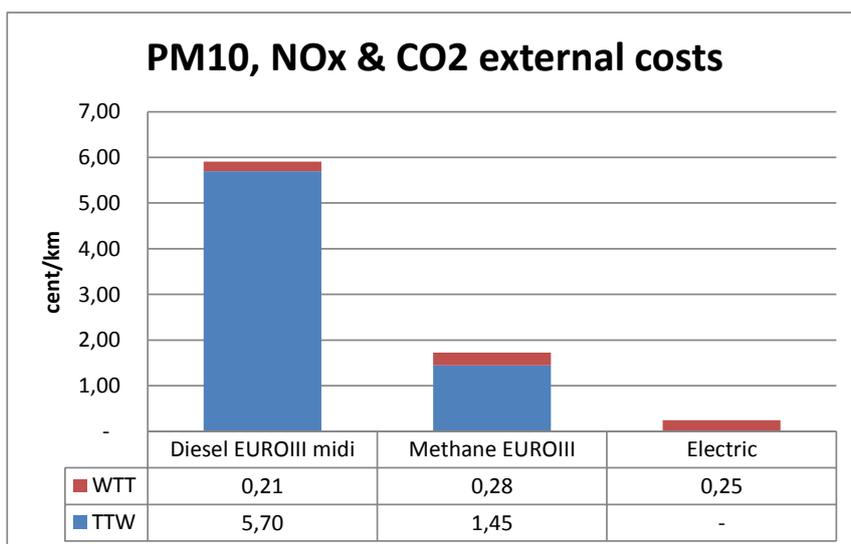


Figura 23: Costo esterno unitario delle emissioni di NOx, PM and CO2 per bus urbani di diverse motorizzazioni (Stime ENEA da diverse fonti dati )

Alle migliori performances in termini di emissioni in atmosfera si aggiunge una minore rumorosità dei veicoli elettrici, sebbene questo aspetto induca qualche preoccupazione riguardo alla sicurezza stradale, in particolare quella delle utenze deboli (anziani, pedoni, ciclisti).

A detrimento dei veicoli elettrici si segnala la questione della dismissione delle batterie esauste, anche se le tecniche di riciclo sono in via di perfezionamento, ridimensionando di pari passo il problema.

Inoltre, una diffusione spinta della motorizzazione elettrica della mobilità pubblica e privata impensierisce per gli effetti che potrebbero derivare sul carico della rete di distribuzione dell'energia; anche in questo caso, molto dipenderà dalla tecnologia maggiormente impiegata per la ricarica, se "lenta", prevalentemente notturna, o "veloce", prevalentemente diurna, che coinciderebbe con il picco di assorbimento attuale. Un altro aspetto importante della questione è il mix di fonti energetiche utilizzate in produzione: un ulteriore incremento della produzione fotovoltaica, ad esempio, si sposerebbe bene con la possibilità di accumulare energia elettrica prodotta durante il giorno nelle batterie dei veicoli elettrici.

All'interno del Report/RSE/131, cui si rimanda, è analizzato un caso di studio di applicazione di sistemi di ricarica rapida alle fermate ed ai capolinea di un insieme di linee di trasporto pubblico a Roma, derivando il carico sulla rete elettrica.

## 6.2 Aspetti tecnologici

I motori elettrici per la trazione veicolare sono in uso da più di un secolo, su treni, tram e filobus, raggiungendo livelli di efficienza impensabili per i motori a combustione interna. In tutti i casi citati, però, l'alimentazione del motore avviene prevalentemente da una rete di distribuzione dell'energia elettrica, tramite contatto.

Ciò in quanto la capacità di accumulo di energia rimane ancora il tallone d'Achille di questo tipo di motorizzazione, nonostante i notevolissimi progressi intervenuti con la messa a punto di nuovi tipi di batterie, in particolare quelle agli ioni di litio, che permettono accumulo di energia a basso peso specifico. Il costo delle batterie, rimane tuttavia un problema non completamente risolto per permettere una diffusione di massa dei veicoli elettrici di tipo BEV (Battery .Electric Vehicles).

Al fine di accrescere la potenza e la autonomia di questa classe di veicoli elettrici sono stati messi a punto diverse architetture dei sistemi di trazione, specificatamente i motori "ibridi" che prevedono l'impiego di un motore a combustione interna installato a bordo per la generazione di energia elettrica di alimentazione delle batterie, del tutto (Full Hybrids HEV) o in parte (Plug-in HEV), la rimanente parte derivando da alimentazione da presa elettrica; o i motori elettrici a celle di combustibile (FEV), in cui l'energia è accumulata a bordo all'interno dell'idrogeno (gas compresso o liquefatto) contenute in celle di combustibile in grado di generare energia elettrica su richiesta.

Lo sviluppo di tecnologie per la ricarica rapida, utilizzando potenze e intensità di corrente molto elevate (40÷50 kW, 60÷100 A) ha aperto nuove prospettive per una maggiore diffusione dei BEVs. Infatti, mentre in passato la ricarica richiedeva diverse ore e necessitava di luoghi adatti, immobilizzando risorse economiche, la ricarica rapida permette di rifornire le batterie dei veicoli all'interno di "tempi morti" e senza particolari necessità di infrastrutturazione, se non quella legata agli impianti per la ricarica stessa.

Grazie alla ricarica rapida, le batterie dei veicoli possono essere di capacità ridotta (e quindi di minore peso, ingombro e costo) ovvero è possibile pensare a veicoli elettrici anche di grandi dimensioni.

Nel caso del trasporto pubblico locale, la ricarica può essere effettuata parzialmente in corrispondenza dei capolinea o, addirittura, delle fermate, sfruttando i tempi morti del servizio senza alterarne le caratteristiche.

L'impiego dei sistemi di ricarica rapida, inoltre, come detto in precedenza, consente una migliore distribuzione spaziale e temporale dell'assorbimento di energia dalla rete elettrica.

Si richiamano nel seguito alcune caratteristiche dei sistemi di ricarica rapida impiegati nel trasporto pubblico locale, ai fini delle analisi contenute nel Report/RDS/2013/131.

Innanzitutto, parlando di ricarica rapida, il primo aspetto che è necessario definire è quello dei tempi effettivamente necessari alla ricarica.

Sono stati esaminati i tempi di ricarica per una batteria al Li-*io* con supercapacitori in funzione dell'intensità della corrente impiegata rispetto alla capacità nominale *C* della batteria. Secondo studi pregressi, i tempi in questione variano da 40' a 185', se si prendono in considerazione cariche complete (del tipo corrente costante/tensione costante) eseguite con valori di amperaggio rispettivamente pari a 3*C* e 0,5*C* (Vedi Figura 24). I corrispondenti rendimenti oscillano fra 0,88 e 0.96, mantenendosi comunque su valori alquanto elevati.

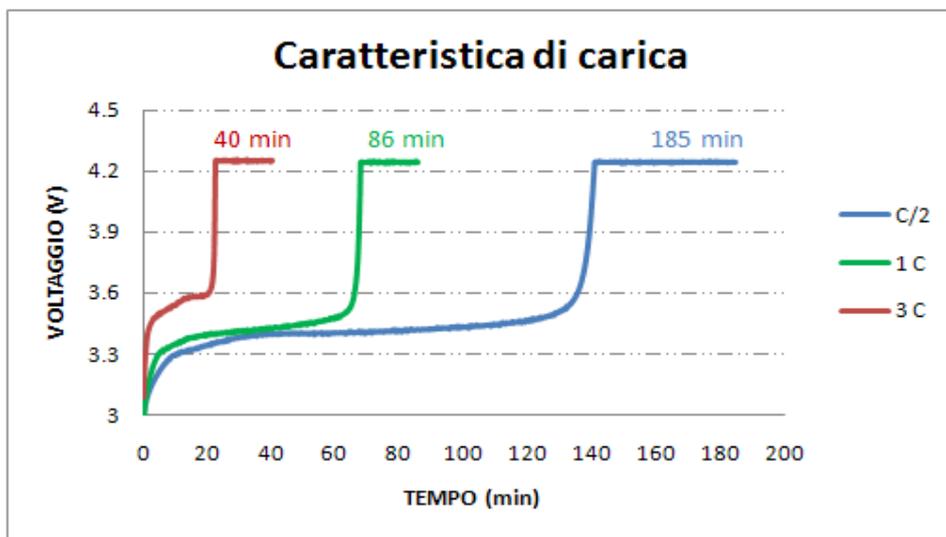


Figura 24 : Tempi di ricarica di batteria agli ioni di litio e supercapacitori

Fonte: G. Pede, Innovative technologies for public transport in Italy, Coiltech, Pordenone, settembre 2013

Nella prassi, la ricarica rapida dei sistemi di alimentazione dei veicoli elettrici viene eseguita a corrente costante per durate fra 1h (carica 1*C*) e 20' (carica 3*C*).

In sostanza, i dispositivi di ricarica come quelli esaminati consentono tempi di ricarica diverse volte più bassi rispetto a quelli convenzionali, i cui tempi sono variabili fra le 4 e le 8 ore. Con tali dispositivi, quindi, è possibile effettuare operazioni di ricarica delle batterie di bus elettrici adibiti al trasporto pubblico in corrispondenza dei capolinea, con il vantaggio di poter utilizzare batterie di minore capacità e quindi di minore costo, oltre che di minore peso, ottenendo così migliori prestazioni energetiche complessive del veicolo. Infatti, l'energia specifica nominale di un veicolo dotato di ultracapacitori è circa pari al 3% di quella di un veicolo a batterie a litio-ione senza ultracapacitori (3.6 contro 118 Wh/kg).

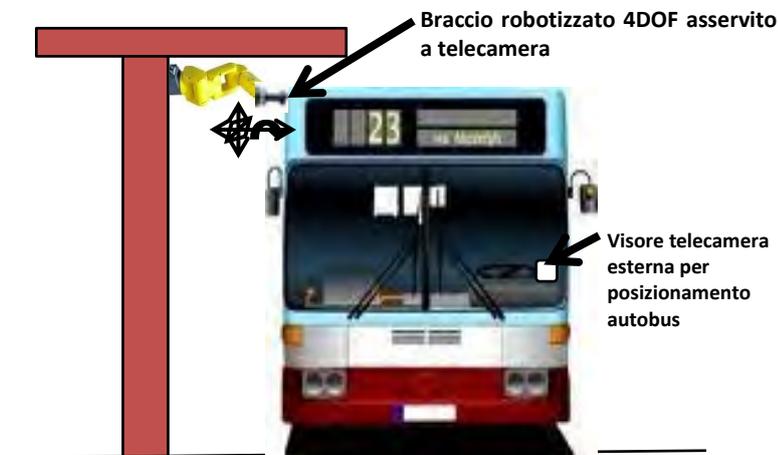
Un'interessante esperienza di ricarica rapida di veicoli per TPL, illustrata nel Report RdS/2012/092 prodotto da ENEA nel corso del precedente anno di ricerca, è quella realizzata nel 2011 dall'azienda californiana Foothill Transit, con l'utilizzo di tre autobus Ecoliner, equipaggiati con batterie Li-Ioni Altairnano. La batteria permette di immagazzinare un'energia nominale pari a 74 kWh, assicurando al mezzo un'autonomia di circa 50 km, che sarebbero insufficienti per il servizio previsto se non venisse effettuata una ricarica fino al 95% ogni 12 km. In questo modo lo stato di carica della batteria non scende mai sotto il 70% del valore nominale, cosa che permette di garantire una lunga durata di esercizio.

La ricarica della batteria avviene in una stazione automatica equipaggiata con un braccio robotizzato, che provvede ad agganciare appositi contatti di potenza sistemati sul padiglione del bus permettendo di effettuare la ricarica in 10 min. L'insieme di tali soluzioni ha assicurato il successo dell'iniziativa: gli autobus, Figura 25, hanno infatti già percorso 25.000 miglia, operando per 16 ore al giorno per 7 giorni a settimana, con una percorrenza giornaliera di 200 km.



**Figura 25: L'autobus Ecoliner impiegato dal 2011 dalla Foothill Transit in California**

L'ENEA, dal canto suo, propone un sistema, di tipo conduttivo (Figura 26) che sfrutta l'accoppiamento spina-presa con un collegamento "automatizzato" ed utilizza un robot industriale ed un gruppo presa-spina della Marechal.



**Figura 26: Il sistema di ricarica rapida alle fermate delle linee di TPL, proposto da ENEA**

Sono presenti sul mercato anche sistemi di tipo induttivo che stabiliscono un accoppiamento magnetico fra veicolo e stazione di ricarica. Questa soluzione, non prevedendo la presenza di alcun punto accessibile in tensione, presenta il massimo livello di sicurezza dal rischio di elettrocuzione che potrebbero correre persone ed animali in prossimità della stazione e del veicolo. Tuttavia è ovviamente più complesso e costoso di quelli conduttivi: pertanto, fino ad oggi è stato sviluppato solo per sistemi di potenza ridotta. Un esempio tipico di soluzione di questo genere è costituito dal sistema IPS (inductive power system) della Wampfler, utilizzato ad esempio dagli autobus della EPT a Torino. La fase di ricarica dura approssimativamente 10 min con la cessione alla batteria di circa 18 Ah, il che comporta un recupero del 7-8% dello stato di carica della stessa. La stazione di ricarica ha una potenza massima di 70 kW, ma la effettiva velocità di ricarica risulta pari in termini energetici a circa 0.6 kWh/min essendo limitata dalle caratteristiche delle batterie al piombo usate dalla EPT.

Con i dispositivi di ricarica appena illustrati, adottando intensità di corrente molte elevate (600 A), è possibile effettuare la ricarica di supercondensatori in pochi secondi (15" circa), compatibili con i tempi di salita e discesa dei viaggiatori. Una tale soluzione permette di ridurre ulteriormente le capacità energetiche necessarie all'esercizio dei veicoli, anche se i costi di investimento salgono a causa di un maggior numero di installazioni necessarie rispetto alla soluzione che prevede la ricarica ai soli capolinea.

Il confronto tecnico-economico delle diverse soluzioni è oggetto delle attività svolte dal CTL della Sapienza, al cui report si rimanda.

## 7 Riferimenti bibliografici

- [ 1] G. Giuli, M. Mancini, P. Zampetti, "Mobility analysis by GPS data recorded on board of private cars", Rivista ENEA, energia-ambiente-e-innovazione n.-4-5-luglio-ottobre 2012
- [ 2] G. Giuli, M. Mancini, P. Zampetti, "Analisi della mobilità mediante dati GPS registrati a bordo di autoveicoli privati", Rivista Mobility Lab, N. 39, Mag/Giu 2011
- [ 3] Octo Telematics s.p.a., <http://www.octotelematics.it>
- [ 4] [http://it.wikipedia.org/wiki/Tempo\\_coordinato\\_universale](http://it.wikipedia.org/wiki/Tempo_coordinato_universale)
- [ 5] E. Paffumi, M. De Gennaro, H. Scholz, G. Martini, "Electric vehicles and charging strategies to meet urban mobility requirements", Proceedings of the 19th International Conference on Urban Transport and the Environment, Kos, Greece, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Italy, 29th-31st May 2013.
- [ 6] EPA, <http://www.epa.gov/greenvehicles/Index.do>, 2012.
- [ 7] G. Giuli, M. Mancini, G. Pedè, "Il mercato dell'auto elettrica", rivista ATA, Ingegneria dell'autoveicolo, Vol. 64 N. 9/10, sett/ott 2011
- [ 8] Mobashwir Khan, Kara M. Kockelman, "Predicting the market potential of plug-in electric vehicles using multiday GPS data", Energy Policy, Volume 46, July 2012, Pages 225-233, Elsevier
- [ 9] G. Giuli, G. Pedè, M. Lelli, "Sulla convenienza per il sistema paese dell'incentivazione dei veicoli elettrici", Convegno AEIT: Mobilità e Trasporto Elettrico per l'Italia di domani, Roma 13-14 Giugno 2012
- [ 10] G. Giuli, P. Zampetti, M. Mancini, "Metodi di analisi dinamica della mobilità mediante elaborazione di dati GPS", Rapporto Tecnico ENEA, RT/2010/41

## 8 Abbreviazioni ed acronimi

CdR = campione di riferimento

GPS = Sistema di Posizionamento Globale (Global Positioning System)

GRA = Grande Raccordo Anulare

SOC = State of charge

VE = Veicolo elettrico.

VCI = Veicoli a combustione interna