



## Ricerca di Sistema elettrico

# Deliverable 1: Scenari di elettrificazione della rete di trasporto pubblico a Roma – Il fabbisogno energetico

*G. Fusco, A. Alessandrini, C. Colombaroni, F. Giubilei*



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

DELIVERABLE 1: SCENARI DI ELETTRIFICAZIONE DELLA RETE DI TRASPORTO PUBBLICO A ROMA – IL FABBISOGNO ENERGETICO

Gaetano Fusco, Adriano Alessandrini, Chiara Colombaroni, Federico Giubilei  
Università di Roma La Sapienza, Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica (CTL)

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 per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità

Obiettivo: Interazioni mobilità elettrica/reti intelligenti

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Stima del fabbisogno energetico conseguente all'introduzione di flotte di veicoli elettrici per il trasporto pubblico e la distribuzione delle merci in campo urbano”*

Responsabile scientifico ENEA: Maria Pia Valentini

Responsabile scientifico CTL: Gaetano Fusco

## Indice

<b>SOMMARIO</b> .....	4
<b>1 INTRODUZIONE</b> .....	5
<b>2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI</b> .....	7
2.1 FORMULAZIONE DEL MODELLO DI COSTO DELLA RETE DI AUTOBUS .....	7
2.2 SVILUPPO DELL'ALGORITMO RISOLUTIVO .....	10
2.3 DERIVAZIONE DELLE CURVE DI CONSUMO ENERGETICO PER LA FLOTTA DI AUTOBUS ELETTRICI .....	12
2.3.1 <i>Curve di consumo energetico specifico per diverse classi di autobus a combustione interna</i> .....	12
2.3.2 <i>Curva sperimentale di consumo energetico specifico per un autobus a batteria di piccole dimensioni</i> .....	12
2.3.3 <i>Derivazione delle funzioni di consumo energetico specifico per autobus a batteria di medie dimensioni</i> ..	13
2.3.4 <i>Metodi di valutazione dei costi ambientali</i> .....	14
2.4 APPLICAZIONE A CASI DI STUDIO.....	14
2.4.1 <i>Selezione delle alternative tecnologiche</i> .....	14
2.4.2 <i>Descrizione del bacino Tiburtina</i> .....	15
2.4.3 <i>Descrizione del bacino Centro storico</i> .....	16
2.4.4 <i>Pianificazione degli scenari di offerta</i> .....	18
2.5 RISULTATI .....	19
2.5.1 <i>Valutazione iniziale degli scenari per il bacino Tiburtina</i> .....	19
2.5.2 <i>Risultati dell'ottimizzazione per il bacino Tiburtina</i> .....	21
2.5.3 <i>Risultati dell'ottimizzazione per il bacino Centro Storico</i> .....	24
2.5.4 <i>Andamento orario degli assorbimenti elettrici nei due bacini di studio</i> .....	25
2.5.5 <i>Stima delle potenze assorbite alle sottostazioni</i> .....	27
<b>3 CONCLUSIONI</b> .....	28
<b>4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b> .....	30
<b>5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI</b> .....	30
<b>6 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO</b> .....	31

## Sommario

Il presente lavoro, svolto nell'ambito dell'Accordo di collaborazione "Stima del fabbisogno energetico conseguente all'introduzione di flotte di veicoli elettrici per il trasporto pubblico e la distribuzione delle merci in campo urbano" tra l'ENEA ed il Centro di ricerca per il Trasporto e la Logistica dell'Università di Roma La Sapienza, ha per oggetto lo studio della fattibilità tecnico economica e del fabbisogno energetico conseguente all'elettrificazione di parte della flotta di veicoli stradali per il trasporto pubblico.

Lo studio è stato affrontato dapprima dal punto di vista teorico, con la formulazione matematica del problema, la definizione dell'algoritmo risolutivo e la messa a punto del metodo di stima dei consumi per diverse tipologie di flotta veicolare; lo studio metodologico è stato quindi integrato con l'applicazione ai due casi di studio applicativi, introducendo alcuni scenari di elettrificazione a batteria delle linee, con differenti ipotesi di tecniche di ricarica, tradizionale o rapida delle batterie.

Il modello è stato applicato in un caso di studio ad una significativa porzione della rete di trasporto pubblico di superficie della città di Roma, suddivisa in due bacini, gravitanti rispettivamente su via Tiburtina e su largo di Torre Argentina. Si sono ipotizzati diversi scenari in base alla tipologia di esercizio (ricarica rapida alle fermate, ricarica ai soli capolinea), alla composizione della flotta (tutte le linee a combustione interna, tutte a trazione elettrica o composizione mista) ed ai diversi parametri funzionali (tempi di ricarica, capacità della batteria, potenze di ricarica). Infine si è operata un'ottimizzazione dei diversi parametri tramite un algoritmo genetico, applicato solamente agli scenari che sono risultati più convenienti.

I risultati della ricerca hanno evidenziato come l'elettrificazione della flotta possa produrre una riduzione piuttosto marcata (attorno al 17%) dei costi netti attualizzati su quindici anni di esercizio, in particolar modo per le voci di costo relative all'energia consumata (-80% circa) ed alle emissioni atmosferiche (-85%) ed acustiche (pressoché azzerate). Ovviamente a causa dell'elevato costo dei veicoli elettrici e delle relative apparecchiature i costi d'investimento risultano essere molto maggiori (+150%) della situazione di riferimento, di rinnovo della flotta con veicoli a combustione interna.

L'analisi del fabbisogno energetico nell'arco della giornata ha evidenziato come i consumi siano maggiormente elevati tra le 7 e le 18, con valori massimi di circa 1600 kWh/h e 3500 kWh/h e variazioni del 24% e del 14%, rispettivamente per il bacino Tiburtina e per quello di Torre Argentina.

Infine, ai fini del dimensionamento delle sottostazioni di alimentazione elettrica, è stata effettuata un'analisi della potenza assorbita ai capolinea durante la ricarica, ipotizzando di aggregare le linee elettriche in 15 capolinea attrezzati per la ricarica rapida, distribuiti sul territorio, con assorbimenti variabili da 50 kW a 400 kW, in funzione del numero e della frequenza delle linee in attestamento.

## 1 Introduzione

L'enorme consumo di risorse energetiche di origine fossile richiede una progettazione del sistema attenta alla sostenibilità energetica, oltre che economica, in accordo con gli obiettivi internazionali di riduzione dei consumi e delle emissioni fissati nel programma Horizon 2020. Grande attenzione viene posta alle grandi aree urbane, dove è crescente l'addensamento della popolazione e conseguentemente l'inquinamento atmosferico, non solo nei Paesi di vecchia industrializzazione ma anche in quelli in via di sviluppo. Le politiche d'intervento prevedono azioni sulla domanda e sull'offerta. Le prime sono finalizzate ad una migliore utilizzazione della capacità della rete, attuata sia spostando la ripartizione modale a favore del modo di trasporto collettivo, sia merci che passeggeri, o pedonale sia distribuendo la domanda nel tempo in modo da ridurre i fenomeni di punta. Le politiche di offerta basate su un ampliamento o un rafforzamento della rete stradale hanno evidenziato chiari limiti in quanto sono state incentivo ad incrementi di domanda individuale, mentre il potenziamento dell'offerta di trasporto collettivo si scontra con la necessità di stanziamento di risorse pubbliche, sempre più scarse; gli orientamenti attuali sono indirizzati verso una riorganizzazione del sistema attuale, con un maggior uso di mezzi a basso impatto ambientale (veicoli elettrici, ibridi, a metano).

Il fabbisogno energetico dei nuovi veicoli elettrici introdotti sulla rete di trasporto richiede il corretto dimensionamento della rete e degli impianti di produzione elettrica; i capolinea e le eventuali fermate attrezzate sono nodi rispettivamente concentrati e distribuiti di assorbimento elettrico durante l'esercizio (di giorno), i depositi sono nodi concentrati di assorbimento al di fuori dell'esercizio (la notte): i primi lavorano in maniera più distribuita nel periodo di picco del consumo; i secondi lavorano in maniera più concentrata nel periodo di morbida del consumo elettrico, quindi rispondono ad una migliore utilizzazione della potenza elettrica. L'eventuale necessità di attrezzare le linee di trasporto pubblico con dispositivi di alimentazione elettrica consentirebbe di sfruttare la presenza delle pensiline alle fermate e ai capolinea per produrre energia elettrica trasformando l'energia solare e soddisfare così parte del fabbisogno diurno dei nuovi veicoli elettrici con nuovi impianti di pannelli fotovoltaici, distribuiti sulla rete.

Il dimensionamento ottimale della flotta di veicoli elettrici alimentati a batteria dipende dal bilancio energetico tra capacità della batteria (e quindi peso del veicolo) e consumo energetico durante l'esercizio, tenendo conto del differente costo dell'energia tra giorno e notte, oltre che del carico di viaggiatori e del diagramma di marcia.

Alle considerazioni sull'esercizio vanno aggiunte quelle sui costi di investimento della rete di distribuzione elettrica, degli impianti di produzione, del parco veicolare, delle batterie di ricambio, alla luce delle diverse alternative tecnologiche. Alla luce dell'analisi benefici-costi richiesta dalla direttiva europea 33/2009 [1] per gli acquisti di veicoli da parte di enti pubblici, le considerazioni economiche vanno riferite al bilancio energetico Well-To-Wheel nell'intera vita utile del veicolo, tenendo conto, anche delle modalità di produzione dell'energia, oltre che delle condizioni di esercizio.

La ricerca, svolta nell'ambito di un accordo di collaborazione tra l'ENEA ed il Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", ha l'obiettivo di inquadrare i principali aspetti metodologici e tecnico-economici che incidono sulla fattibilità dell'introduzione di veicoli elettrici nel sistema di trasporto collettivo stradale di passeggeri e merci, tenendo conto sia degli elementi prettamente trasportistici di efficiente organizzazione del servizio e di efficace soddisfacimento della domanda, sia degli aspetti di approvvigionamento dell'energia elettrica. Per assicurare un adeguato livello di realismo, la ricerca è stata articolata su due casi di studio pratici, relativi rispettivamente alla rete di trasporto pubblico ed alla distribuzione urbana delle merci in particolari aree della città di Roma, opportunamente scelte in funzione della rappresentatività e della percorribilità delle prospettive realizzative.

Il presente deliverable descrive lo studio del problema di progettazione del trasporto pubblico con autobus elettrici e la relativa applicazione al caso di studio in due diversi bacini della rete urbana della città di Roma: uno semi-periferico, l'altro gravitante sul Centro storico.

Lo studio viene affrontato dapprima dal punto di vista teorico, con la formulazione matematica del problema, la definizione dell'algoritmo risolutivo e la messa a punto del metodo di stima dei consumi per diverse tipologie di flotta veicolare; lo studio metodologico viene quindi integrato con l'applicazione ai due casi di studio applicativi, introducendo alcuni scenari di elettrificazione a batteria delle linee, con differenti ipotesi di tecniche di ricarica, tradizionale o rapida delle batterie. Per i diversi scenari tecnologici di elettrificazione sono stati stimati i costi interni ed esterni ed è stata stimata la distribuzione spazio-temporale del fabbisogno energetico, consentendo così di stimare anche le ricadute sulla rete di distribuzione elettrica.

Entrambi i casi di studio sono stati affrontati a seguito di un'accurata ricostruzione della domanda e dell'offerta nell'area di studio. Una volta ricostruito lo scenario di domanda e di offerta, sono stati applicati i modelli di consumo energetico e di costo, per le diverse voci di costo di investimento, di manutenzione, ambientali, di rumore, oltre ai costi dell'utenza.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Formulazione del modello di costo della rete di autobus

Il problema di progetto di rete con autobus elettrici viene formulato come problema di ottimo, consistente nella minimizzazione del costo del sistema del trasporto per tutta la vita utile, inclusi i costi interni ed esterni per la fornitura dell'energia e quelli ambientali, oltre ai costi di investimento per l'acquisto della flotta e degli impianti ed ai costi operativi del servizio di trasporto pubblico, al variare della tipologia della flotta e delle modalità di ricarica. I costi dei consumi energetici tengono conto dei costi esterni dell'intero processo di produzione e distribuzione per ciascuna fonte energetica (costi Well-to-Wheel). Il sistema vincolare include le classiche equazioni di conservazione dell'energia e del flusso veicolare ed i vincoli di capacità di ricarica delle batterie e di carico dei passeggeri a bordo.

La domanda di viaggiatori di ciascuna linea ed in ciascuna fermata è ipotizzata data. Questo vincolo è peraltro rimovibile introducendo nel sistema vincolare una funzione di assegnazione alla rete, data la domanda origine-destinazione (domanda rigida) o una funzione che lega la domanda la costo medio del trasporto percepito dall'utente (domanda elastica).

La funzione obiettivo è la somma dei costi attuali netti ed è composta dai costi di investimento, costi di manutenzione, costi operativi, costi esterni e costi degli utenti, che sono indicati rispettivamente dai simboli CI, CM, CO, CU and CE nelle equazioni da (1) a (5). I primi due termini sono dovuti a loro volta al contributo fornito dai differenti elementi del sistema di trasporto pubblico e della rete elettrica, vale a dire: i veicoli e gli impianti ai depositi, ai capolinea ed alle fermate. Gli ultimi tre termini sono relativi alla produzione del servizio e sono segmentati per fascia oraria al fine di differenziare tra le condizioni operative nei periodi di morbida e di punta, sia per la variazione della domanda di trasporto che per la domanda di energia.

E' da osservare che i costi operativi sono usualmente definiti come somma dei costi relativi al personale di guida, carburante o consumo energetico, pneumatici, lubrificanti, tasse, assicurazioni e costi generali. Nella presente analisi, invece di separare i costi energetici in costi operativi (legati al segmento Tank-To-Wheel) e costi esterni (legati al segmento Well-to-Tank), si preferisce calcolare i costi del consumo energetico Well-To-Wheel nel loro complesso e aggregare i costi energetici ed ambientali, poiché i secondi possono essere considerati proporzionali ai primi, pur se con proporzionalità diverse per le due componenti Well-to-Tank e Tank-To-Wheel.

La funzione generale di costo energetico ed ambientale, identificata con il simbolo CE nell'equazione (4), include in effetti anche i costi dovuti al rumore, sebbene questi siano abitualmente ipotizzati come semplicemente proporzionali alla distanza percorsa, secondo fattori dipendenti dall'ora, di giorno o di notte, e dall'ambito, urbano o extra-urbano [2]. Tasse ed accise sono escluse dall'analisi, essendo un mero trasferimento tra differenti componenti della società. Pertanto, nella formulazione del modello i costi operativi CO non includono i costi energetici, che sono invece sommati ai costi ambientali. I costi del personale viaggiante sono direttamente proporzionali al tempo totale di guida, mentre gli altri costi, per i lubrificanti e gli pneumatici, sono proporzionali alla distanza percorsa. I costi generali e gli altri costi operativi legati all'uso del veicolo, come i costi dell'assicurazione, sono ipotizzati proporzionali ai costi di manutenzione. Infine, i costi degli utenti CU sono proporzionali alla somma del tempo trascorso dagli utenti a bordo ed in attesa alle fermate ed ai capolinea.

E' bene far notare che la definizione di un'unica funzione di costo ambientale ed energetico ha la sola finalità di semplificare il modello. Nell'applicazione i calcoli sono effettuati separatamente per ciascuna delle due componenti di costo.

Inoltre, nell'applicazione del modello, ai fini della valutazione tecnico-economica, tutti i costi sostenuti nel corso della vita utile del sistema vengono attualizzati al presente e sommati nella funzione obiettivo. Per semplicità, si assume che l'operazione di attualizzazione sia inclusa nella funzione di costo all'anno h.

$$CI = \sum_{d=1}^D ci_d (W_d) + \sum_{z=1}^Z ci_t (W_t) + \sum_{s=1}^S ci_s (W_s) + \sum_{k=1}^K ci_k m_k \quad (1)$$

$$CM = \sum_{d=1}^D cm_d(W_d) + \sum_{z=1}^Z cm_z(W_z) + \sum_{s=1}^S cm_s(W_s) + \sum_{k=1}^K cm_k m_k \quad (2)$$

$$CO = \sum_{h=1}^T \left[ \sum_{j=1}^J f_j^h \left( \sum_{a=1}^A \delta_{a,j} l_a + \sum_{z=1}^Z t_{z,j} \right) \cdot cd + \sum_{h=1}^T \sum_{j=1}^J f_j^h \sum_{a=1}^A \delta_{a,j} l_a \sum_{k=1}^K \delta_{j,k} co_k \right] \quad (3)$$

$$CE = \sum_{h=1}^T \sum_{j=1}^J f_j^h \sum_{a=1}^A \delta_{a,j} l_a \sum_{k=1}^K \delta_{k,j} ce_a^k (v_{a,h}^k, p_{a,j}^h) \quad (4)$$

$$CU = \sum_{h=1}^T \sum_{j=1}^J \lambda_j \left( \sum_{a=1}^A p_{a,j}^h t_{a,j}^h + \beta \sum_{s=1}^S q_{s,j}^h w_{s,j}^h + \beta \sum_{z=1}^Z q_{z,j}^h w_{z,j}^h \right) \quad (5)$$

con il seguente significato dei simboli:

CI: costo annuo di investimento per impianti e veicoli

ci<sub>d</sub>: costo annuo di investimento per impianti elettrici di potenza W<sub>d</sub> nel deposito di autobus d

ci<sub>z</sub>: costo annuo di investimento per impianti elettrici di potenza W<sub>z</sub> al capolinea z

ci<sub>s</sub>: costo annuo di investimento per impianti elettrici di potenza W<sub>s</sub> alla fermata s

ci<sub>k</sub>: costo unitario di investimento per l'acquisto di veicoli di tipo k

CM: costo annuo di manutenzione per impianti e veicoli

cm<sub>d</sub>: costo unitario di manutenzione per impianti elettrici di potenza W<sub>d</sub> nel deposito di autobus d

cm<sub>z</sub>: costo unitario di manutenzione di impianti elettrici di potenza W<sub>z</sub> al capolinea z

cm<sub>s</sub>: costo unitario di manutenzione di impianti elettrici di potenza W<sub>s</sub> alla fermata s

cm<sub>k</sub>: costo unitario di manutenzione di veicoli di tipo k

CO: costo annuo operativo dei veicoli

cd: costo orario del personale di guida

co<sub>k</sub>: costo operativo unitario per km per veicoli di tipo k

f<sub>j</sub><sup>h</sup>: frequenza della linea j nella fascia oraria h

t<sub>a,j</sub><sup>h</sup>: tempo medio di percorrenza dell'arco a per gli autobus della linea j nella fascia oraria h

t<sub>z,j</sub><sup>h</sup>: tempo di attesa del personale di guida al capolinea z per la linea j nella fascia oraria h

l<sub>a</sub>: lunghezza dell'arco a

δ<sub>a,j</sub> = 1 se l'arco a appartiene alla linea j e 0 altrimenti

δ<sub>k,j</sub> = 1 se i veicoli di tipo k sono assegnati alla linea j e 0 altrimenti

CU: costo annuale per gli utenti

λ<sub>j</sub>: valore medio del tempo per gli utenti della linea j

β: fattore di peso del tempo di attesa rispetto al tempo trascorso a bordo

p<sub>a,j</sub><sup>h</sup>: numero di passeggeri a bordo sull'arco a per gli autobus della linea j nella fascia oraria h

q<sub>z,j</sub><sup>h</sup>: numero di passeggeri in attesa al capolinea z per gli autobus della linea j nella fascia oraria h

q<sub>s,j</sub><sup>h</sup>: numero di passeggeri in attesa alla fermata s per gli autobus della linea j nella fascia oraria h

w<sub>s,j</sub><sup>h</sup>: tempo di attesa dei passeggeri in attesa alla fermata s per gli autobus della linea j nella fascia oraria h

w<sub>z,j</sub><sup>h</sup>: tempo di attesa dei passeggeri in attesa al capolinea z per gli autobus della linea j nella fascia oraria h

CE: costo annuo ambientale e dell'energia richiesta dai veicoli

ce<sub>a,k</sub>: costo unitario ambientale e di consumo energetico sull'arco a veicoli di tipo k

v<sub>a,k</sub><sup>h</sup>: velocità commerciale sull'arco a veicoli di tipo k nella fascia oraria h

h: generica fascia oraria

T: periodo temporale di studio, corrispondente alla vita utile di veicoli ed impianti

D: numero di depositi

Z: numero di capolinea

S: numero di fermate

K: numero di classi veicolari

J: numero di linee di autobus

A: numero di archi della rete di autobus

Il sistema vincolare comprende: le equazioni (6) dell'energia consumata nell'insieme delle corse di ciascuna linea  $j$ ; le equazioni (7) di conservazione del flusso veicolare che legano il numero di veicoli, la velocità operativa e la frequenza di ciascuna linea  $j$ ; i vincoli energetici (8) che richiedono che l'energia consumata in ciascuna linea sia minore dell'energia caricata in ciascuna stazione di ricarica localizzata alle fermate, ai capolinea e ai depositi. Infine, i tempi di attesa alle fermate ed ai capolinea (9) sono determinati dalle condizioni sulle frequenze e sui tempi di ricarica, che sono dipendenti dal tipo di sistema di ricarica e di batteria.

$$L_j = \sum_{h=1}^{H(j)} f_j^h \sum_{a=1}^A \delta_{a,j} l_a \sum_{k=1}^K \delta_{k,j} g_a^k (v_{a,k}^h, p_{a,j}^h) \quad (6)$$

$$m_j^h = f_j^h \sum_{a=1}^A \delta_{a,j} \frac{l_a}{v_{a,j}^h} \quad (7)$$

$$L_j \leq \max_h \left\{ m_j^h \sum_{d=1}^D \delta_{j,d} \eta_d W_d \Delta t_{j,d} + \sum_{h=1}^{H(j)} f_j \sum_{s=1}^S \delta_{j,s} \eta_s W_s \Delta t_s + \sum_{h=1}^{H(j)} f_j \sum_{z=1}^Z \delta_{j,z} \eta_z W_z \Delta t_z \right\} \quad (8)$$

$$t_{s,j}^h = \max \left\{ \frac{1}{f_j^h}, \Delta t_{j,s} \right\} \quad t_{z,j}^h = \max \left\{ \frac{1}{f_j^h}, \Delta t_{j,z} \right\} \quad (9)$$

dove sono stati introdotti i seguenti simboli:

$L_j$ : consumo medio giornaliero della linea  $j$

$g_a^k$ : consumo energetico unitario per un veicolo di tipo  $k$  sull'arco  $a$

$m_j^h$ : numero di veicoli in servizio nella linea  $j$  nella fascia oraria  $h$

$v_{a,j}^h$ : velocità commerciale sull'arco  $a$  per gli autobus della linea  $j$  nella fascia oraria  $h$

$\delta_{j,d} = 1$  se la linea  $j$  utilizza il deposito  $d$  e 0 altrimenti

$\delta_{j,s} = 1$  se la fermata  $s$  appartiene alla linea  $j$  e 0 altrimenti

$\delta_{j,z} = 1$  se la linea  $j$  utilizza il capolinea  $z$  e 0 altrimenti

$H(j)$ : durata del servizio sulla linea  $j$

$W_d$ : potenza nominale al deposito  $d$

$W_s$ : potenza nominale alla fermata  $s$

$W_z$ : potenza nominale al capolinea  $z$

$\eta_d$ : efficienza del dispositivo di ricarica al deposito  $d$

$\eta_s$ : efficienza del dispositivo di ricarica alla fermata  $s$

$\eta_z$ : efficienza del dispositivo di ricarica al capolinea  $z$

$\Delta t_{j,d}$ : tempo di sosta al deposito  $d$  per gli autobus della linea  $j$

$\Delta t_d$ : tempo medio di sosta alla fermata  $s$

$\Delta t_{j,z}$ : tempo medio di sosta al capolinea  $z$  per gli autobus della linea  $j$

La dimensione della flotta per ciascun tipo di veicolo  $k$  viene determinata applicando l'equazione (7) nel periodo di punta ed ottenendo così il numero  $\max_j \{m_j^h\}$ . La frequenza ottima viene calcolata invece applicando la cosiddetta "regola della radice quadrata" [3] che minimizza il costo totale per gli utenti e per gli operatori nell'ipotesi di arrivi uniformi dei passeggeri.

$$f_j^h = \sqrt{\frac{\lambda_j \sum_{a=1}^A \delta_{a,j} p_{a,j}^h}{\frac{a=1}{K} \sum_{k=1}^K \delta_{j,k} c o_k}} \quad (10)$$

## 2.2 Sviluppo dell'algoritmo risolutivo

Il problema di ottimo formalizzato nel paragrafo precedente ricade, nella sua forma più generale, nei problemi di transit network design, famiglia di problemi non convessi, la cui soluzione dipende dalla struttura della rete e dei costi, generalmente affrontati in letteratura con approccio euristico o meta- euristico, mediante algoritmi genetici o algoritmi swarm. In questo studio viene applicato un algoritmo genetico, che gli autori hanno già precedentemente applicato con successo a problemi di transit network design e che ben si presta a successive generalizzazioni all'ottimizzazione di un numero notevole di variabili discrete, come, in particolare, per la struttura delle linee e l'assegnazione dei veicoli a linee e depositi.

L'algoritmo genetico è un algoritmo evolutivo basato sulla applicazione sequenziale ed iterativa dei seguenti operatori:

- **Scelta della popolazione iniziale:** determina l'ampiezza dello spazio di ricerca. Più grande è e migliore la soluzione ha la possibilità di essere. Ovviamente una popolazione più grande comporta un tempo di calcolo più lungo per convergere verso una soluzione ottima;
- **Elitismo:** è uno dei principi con cui la procedura conserva gli individui migliori ad ogni iterazione. I geni degli individui migliori vengono mantenuti per essere impiegati nelle generazioni seguenti;
- **Crossover:** è il principale operatore con cui l'algoritmo crea nuovi individui. Il crossover avviene con una fissata probabilità di accadimento e può manifestarsi in diverse varianti, le più comuni delle quali sono: single point cross over, che consiste nell'incrocio di una metà di genoma di un individuo con una metà di quello dell'individuo successivo, oppure double point cross over, che consiste nell'incrocio a tre parti anziché due;
- **Mutazione:** al fine di permettere all'algoritmo di allontanarsi da un punto di minimo locale in cui può restare bloccato si ammette la possibilità di mutazione genetica casuale. Selezionando una probabilità di mutazione si regola l'accadimento di questo fenomeno. In sostanza un gene cambia da un'iterazione all'altra in modo differente dal patrimonio genetico dei genitori. È importante che la probabilità di mutazione sia limitata, in quanto per valori eccessivi l'algoritmo avrebbe grande difficoltà a convergere.

Ognuno di questi principi è regolato da un parametro. I valori assunti per il caso specifico, selezionati empiricamente dopo una serie di test, sono raccolti nella Tabella 1.

**Tabella 1. Valori dei parametri degli operatori genetici utilizzati nell'applicazione.**

	Simbolo	Valore
Dimensione della popolazione	A	20
Numero di individui mantenuti per elitismo	$N_E$	2
Probabilità di Crossover	$P_C$	0,8
Probabilità di Mutazione	$P_M$	0,2

Un algoritmo evolutivo per essere efficace necessita di un set di parametri di arresto, poiché, diversamente, continuerebbe a girare per un tempo infinito. La migliore soluzione trovata entro il rispetto dei criteri di stop sarà assunta come la soluzione ottima al problema. Sono possibili diversi criteri di stop. Tuttavia i più comunemente utilizzati sono i seguenti:

- Numero fisso di generazioni: stabilisce il massimo numero di generazioni consentite;
- Numero fisso di generazioni di stallo: stabilisce il numero massimo di generazioni identiche consentito prima che la procedura si arresti;
- Limite di tempo: non sono consentite generazioni oltre questo limite di tempo;
- Limite di tempo in stallo: non sono consentite generazioni, a prescindere dal numero raggiunto, se il tempo in cui non si manifestano cambiamenti eccede questo limite;
- Limite di fitness: non sono consentite generazioni se la fitness scende al di sotto di questo valore.

I valori numerici stabiliti per i suddetti criteri di stop, anch'essi determinati empiricamente dopo una serie di test prestazionali, sono raccolti nella Tabella 2. Si noti che il valore "Inf" o "-Inf" sta ad indicare che il criterio non è attivo.

**Tabella 2. Valori dei parametri di arresto dell'algoritmo genetico utilizzati nell'applicazione.**

	Simbolo	Unità	Valore
Numero di generazioni	$G_A$	Gen	500
Numero di generazioni in stallo	$S_A$	Gen	50
Limite di tempo	$G_T$	S	Inf
Limite di tempo in stallo	$S_T$	S	Inf
Limite della <i>fitness</i>	$F_L$	-	- inf

Nell'applicazione alla progettazione della rete di veicoli elettrici, l'algoritmo genetico è stato utilizzato per ottimizzare le principali caratteristiche tecnologiche della flotta e del sistema di ricarica, assumendo che la struttura della rete di linee e la tipologia del servizio rimangano invariati.

Il problema è stato quindi codificato in termini genetici associando un cromosoma ad ogni variabile da dimensionare. Il genoma del problema in esame è dunque costituito da una stringa:

$B_k$	$w_f$	$w_z$	$T_f$	$T_z$
-------	-------	-------	-------	-------

formata dalle 5 seguenti variabili:

- $B_k$  è la capacità in kWh della batteria installata sul veicolo di tipo  $k$ ;
- $w_f$  è la potenza disponibile in kW per la ricarica alle fermate;
- $w_z$  è la potenza disponibile in kW per la ricarica ai capilinea;
- $T_f$  e  $T_z$  sono i tempi di sosta in secondi per la ricarica rispettivamente alle fermate ed ai capilinea.

Inoltre, è opportuno fissare un dominio di ricerca dei valori delle variabili, cioè stabilire dei limiti superiori ed inferiori per ciascun gene. Dal momento che il genetico appartiene alla famiglia degli algoritmi evolutivi, parte da un punto iniziale e tenta di convergere verso una soluzione ottima. Tale punto può anche essere scelto casualmente e, se il sistema vincolare è ben costruito, si potrà applicare una procedura iterativa che consentirà di evitare la fissazione di un punto iniziale attorno al quale la soluzione orbiterà. In questo caso, il processo può essere molto più lungo e richiedere un gran numero di iterazioni. In particolare, dalla seconda iterazione in poi, il punto iniziale sarà uguale alla soluzione del run precedente. Questa modalità permette di controllare i movimenti della soluzione ottima e assicura che si stia usando un punto di partenza valido. Tuttavia, per la prima iterazione, il limite inferiore e superiore dovranno essere stabiliti in aggiunta al sistema vincolare. Questo eviterà che l'algoritmo scelga una soluzione infattibile da un punto di vista pratico. Il dominio di validità è stabilito come riportato nella Tabella 3.

**Tabella 3. Estremi inferiore e superiore delle variabili da ottimizzare.**

	unità	LB (limite inferiore)	UB (limite superiore)
$B_k$	kWh	2	100
$w_f$	kW	0	1000
$w_z$	kW	0	1000
$T_f$	s	20	45
$T_z$	s	300	600

### 2.3 Derivazione delle curve di consumo energetico per la flotta di autobus elettrici

Vista la diffusione ancora sperimentale o pre-prototipale di autobus a batteria di medie o grandi dimensioni, le curve sperimentali di consumo energetico disponibili in letteratura per le diverse classi di autobus sono relative ai veicoli a combustione interna, mentre quelle degli autobus a batterie sono relative esclusivamente a veicoli di piccole dimensioni.

Per derivare le funzioni di consumo di autobus elettrici di medie dimensioni si è proceduto quindi ad applicare un metodo per analogia, assumendo che i fattori che incidono sul consumo unitario agiscano in maniera analoga per i veicoli elettrici ed a combustione interna, assumendo che i fattori che incidono sul consumo unitario agiscano in maniera analoga per i veicoli elettrici ed a combustione interna. E' da precisare che, in realtà, il peso degli autobus elettrici, e quindi il loro consumo specifico, cresce con la capacità più rapidamente di quello degli autobus a combustione interna, a causa della necessità di batterie di maggiore capacità e quindi maggiore peso. In prima approssimazione, l'ipotesi può considerarsi accettabile per ottenere un modello semplice di carattere generale. Nella definizione dei diversi scenari sarà poi introdotta una funzione correttiva di natura empirica che tiene conto dell'incremento di consumo specifico in funzione della capacità di carica della batteria.

#### 2.3.1 Curve di consumo energetico specifico per diverse classi di autobus a combustione interna

Le curve di consumo specifico in funzione della velocità per differenti dimensioni e masse dei veicoli a combustione interna sono state tratte dalle tabelle CORINAIR [4] e dalla procedura MEET descritta da Hickman [4], applicando opportuni coefficienti di correzione sulla base dei risultati di sperimentazioni su strada condotte da ENEA. La procedura assume come variabile indipendente la velocità, mentre i parametri sono la pendenza stradale ed il fattore di carico. Per semplicità, si riportano di seguito le espressioni relative alla marcia in piano ed al veicolo vuoto, rimandando al lavoro citato per la trattazione completa:

$$y = k + ae^{-bv} + ce^{-dv} \quad (11)$$

$$y = \frac{1}{a + bv + cv^2} \quad (11')$$

dove y il consumo specifico in g/km e v è la velocità media in km/h, ed essendo la prima equazione valida per autobus di peso fino a 7,5t e tra 12,5t e 15t, e la seconda equazione valida per autobus di peso compreso tra 7,5t e 12,5t. I valori di coefficienti per diverse categorie di peso sono riportate nella Tabella 4.

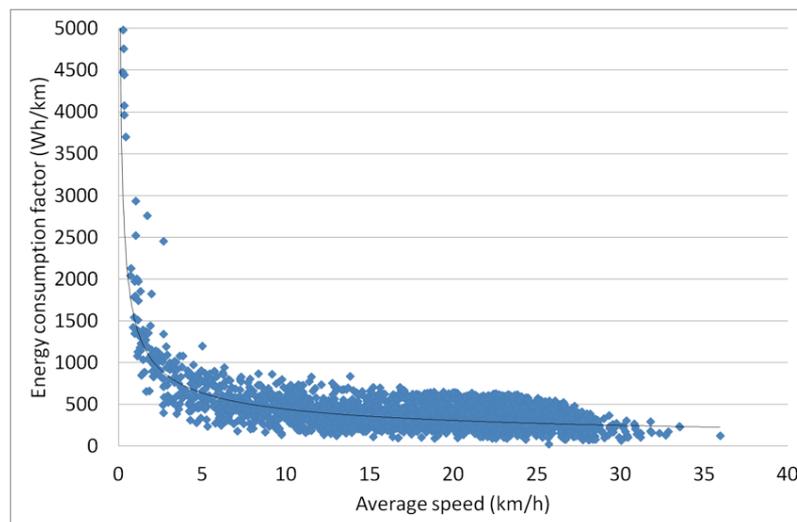
**Tabella 4. Valori dei coefficienti del modello di consumo energetico per diverse classi di autobus elettrici**

	a	b	c	d	K
U-Bus Midi 12.5/15t	486,6406	0,080972386	1196062,934	1,629846	134,0512
U-Bus Mini 5/7.5t	1,014595	-0,041221526	187,4573231	0,077275	75,34241
U-Bus Mini 7.5/12.5t	0,001565	0,000225411	-1,9138E-06		

Fonte: 3. EEA [4].

#### 2.3.2 Curva sperimentale di consumo energetico specifico per un autobus a batteria di piccole dimensioni

Gli assorbimenti elettrici dei veicoli elettrici a batteria sono state desunte da dati sperimentali rilevati dall'Enea e dal CTL durante una campagna di rilevazioni effettuata tra settembre e novembre del 2011, su una flotta di veicoli di piccole dimensioni, i minibus elettrici a batteria Gulliver Technobus, aventi un peso di circa 6t. I risultati dell'osservazione sono riportati in Figura 1.



**Figura 1. Curva sperimentale di consumo specifico per un autobus elettrico a batteria di piccole dimensioni (Gulliver-Technobus) ricavata in un precedente studio CTL-ENEA.**

Come si può osservare, i valori sono fortemente dispersi e lo sono tanto più quanto più bassa è la velocità media. Questo è dovuto principalmente al fatto che su un determinato itinerario una velocità media molto bassa (2-6 km/h) sta ad indicare una forte congestione e dunque un elevato numero di stop&go, che influiscono enormemente sul consumo specifico medio. Si è quindi preferito confinare la validità delle curve di consumo specifico nell'intervallo di velocità media superiore a 6 km/h.

La corrispondente curva sperimentale ha la seguente equazione:

$$g(v) = 0,050881 + 1,73 \cdot 10^{-7} v^3 + 4,02517 v^{-1} \quad (12)$$

essendo  $g$  il consumo specifico in Wh/km e  $v$  la velocità in km/h.

### 2.3.3 Derivazione delle funzioni di consumo energetico specifico per autobus a batteria di medie dimensioni

Le funzioni di consumo specifico per gli autobus elettrici sono state derivate per analogia con le curve di consumo specifico dei veicoli termici, a partire dalle due curve disponibili per autobus di piccole dimensioni. Il primo passo della procedura è consistito nel calcolare per ciascun valore di velocità il rapporto  $\varphi$  tra la curva di consumo specifico dell'autobus elettrico di 6t  $g(v)$  e la corrispondente curva di consumo specifico medio di un autobus a combustione interna  $y(v)$  della classe compresa tra 5 e 7,5t.

L'insieme dei valori del rapporto  $\varphi$  per diversi valori della velocità  $v$  è stato assunto come funzione di trasformazione  $\varphi(v)$  tra le funzioni  $y(v)$  e  $g(v)$  per le altre classi di peso, tra 7,5t e 12,5t e tra 12,5t e 15t.

I corrispondenti valori puntuali sono stati poi oggetto di regressione non lineare per ottenere delle funzioni in forma chiusa. La curva dei consumi di carburante del veicolo a combustione interna è stata riportata in Wh/km assumendo il potere calorico del carburante pari a 11,63 kWh/kg e la densità pari a circa 0,75kg/l. La curva dei consumi del veicolo elettrico è stata riportata al segmento WTW, tramite il rendimento di produzione dell'energia elettrica italiano, assumendo un coefficiente di rendimento 0,46.

Si sono così ottenute le due curve di consumo elettrico per le tre classi di autobus:

$$g(v) = 2,3602 \cdot v^{-0,728} \quad (\text{per bus di 6t}) \quad (13)$$

$$g(v) = 1,858 \cdot v^{-0,578} \quad (\text{per bus di 9t}) \quad (13')$$

$$g(v) = 2,8667 \cdot v^{-0,657} \quad (\text{per bus di 12t}) \quad (13'')$$

riportate graficamente nella Figura 2.

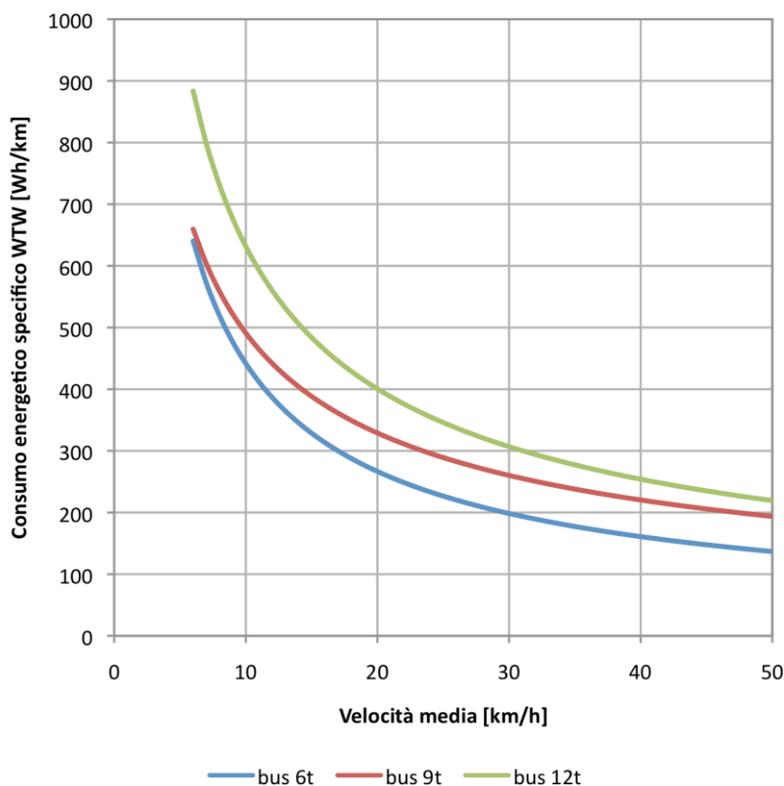


Figura 2. Curve di consumo specifico WTW stimate per le tre categorie di autobus elettrici operanti in Italia.

### 2.3.4 Metodi di valutazione dei costi ambientali

Per quanto riguarda la valutazione dei costi esterni delle emissioni, si è fatto riferimento alla metodologia sviluppata da ENEA a supporto del presente studio e descritta nel Report RdS/2013/133.

I costi specifici dovuti al rumore sono stati valutati direttamente in forma monetaria applicando il metodo descritto nello European Handbook on Transport environmental costs per spostamenti in campo urbano [2].

## 2.4 Applicazione a casi di studio

Il modello di costo per la progettazione della rete di veicoli elettrici è stato applicato in due distinte zone della rete di autobus di Roma, aventi caratteristiche diverse e complementari. La prima zona è il bacino della via Tiburtina nel suo tratto urbano, e prende in considerazione tutte le linee che attestano al capolinea della stazione Tiburtina e che insistono sulla periferia orientale della città. La seconda zona è il bacino centrale e in particolare tutte le linee transitanti sulla fermata di Largo di Torre Argentina.

Si è scelto di dividere l'area di studio in due bacini distinti perché nel primo si è calibrato il modello e si sono fatte considerazioni sul suo funzionamento, nel secondo, invece, si è validato e se ne è testata la robustezza.

Per ciascun bacino sono state effettuate le simulazioni del sistema di trasporto pubblico separatamente per l'ora di punta e l'ora di morbida, considerando le velocità commerciali delle linee rilevate nelle rispettive fasce orarie. I risultati sono poi estesi all'intera giornata, moltiplicando i costi degli utenti per i flussi di domanda ed i costi legati ai veicoli per le frequenze nelle altre fasce orarie, in modo da ottenere la distribuzione oraria del servizio e dei relativi costi.

### 2.4.1 Selezione delle alternative tecnologiche

I veicoli elettrici si stanno diffondendo sempre più nei Paesi maggiormente industrializzati specialmente nel settore del trasporto privato. Diversamente, continuano a essere poco impiegati nel trasporto pubblico. Allo stesso tempo molteplici sono le tecnologie disponibili per l'utilizzo di questi mezzi. I veicoli elettrici a

batteria (BEV) sono la categoria di mezzi più flessibili nello spazio, poiché richiedono il minor numero di infrastrutture. Tuttavia, a causa della tecnologia di cui ancora oggi si dispone, questi risultano essere anche quelli con la minor flessibilità temporale per via della scarsa autonomia di cui sono dotati. Le tecnologie al momento più diffuse ed anche più promettenti per la propulsione elettrica dei veicoli di più grandi dimensioni sono le batterie agli ioni di litio e gli ultracapacitori, che si differenziano fortemente nei parametri elettrici e nelle diverse situazioni di esercizio. A queste due tipologie tecnologiche si è fatto riferimento nello studio. Le principali caratteristiche tecniche sono riportate nella Tabella 5.

**Tabella 5. Specifiche tecniche ipotizzate nell'applicazione per le batterie agli ioni di litio e per i supercapacitori.**

	Li-ion	UltraCap
Potenza specifica in scarica [W/kg]	Fino a 2 100	Fino a 10 000
Potenza specifica in ricarica [W/kg]	Fino a 300	Fino a 10 000
Energia specifica nominale [Wh/kg]	≈ 118	≈ 3.6
Rendimento	0,82 – 0,88	0,85 – 0,99
Cicli di carica e scarica	10 000	500 000

Il modello di calcolo dei costi e dei consumi è stato implementato sia per i veicoli a combustione interna (CI) che per i veicoli elettrici a batteria (BEV). Le caratteristiche tecniche ed operative dei veicoli ipotizzate nell'applicazione sono riassunte nella Tabella 6.

**Tabella 6. caratteristiche tecniche ed operative dei veicoli ipotizzate nell'applicazione.**

	Unità	BEV			IC		
Codice tipo veicolo	-	1	2	3	4	5	6
Costo di acquisto	[€]	300.000	240.000	180.000	200.000	360.000	100.000
Lunghezza	[m]	12	10	8	12	18	6
Capienza	[posti/veic]	100	85	65	100	160	50
Batteria	-	Li-ion	Li-ion	Li-ion	Nessuna		
Consumo specifico	[kWh/km]	2,67	1,97	1,57	6,33	9,79	3,52
Costi ambientali	[€/km]	0,0269	0,0198	0,0159	0,146	0,204	0,117
Costi energetici	[€/km]	0,1822	0,1346	0,1069	0,2831	0,4381	0,1575
Costi di rumore	[€/km]	0,002	0,0018	0,0013	0,1214	0,18	0,0824
Vita utile	[anni]	15	15	15	15	15	15

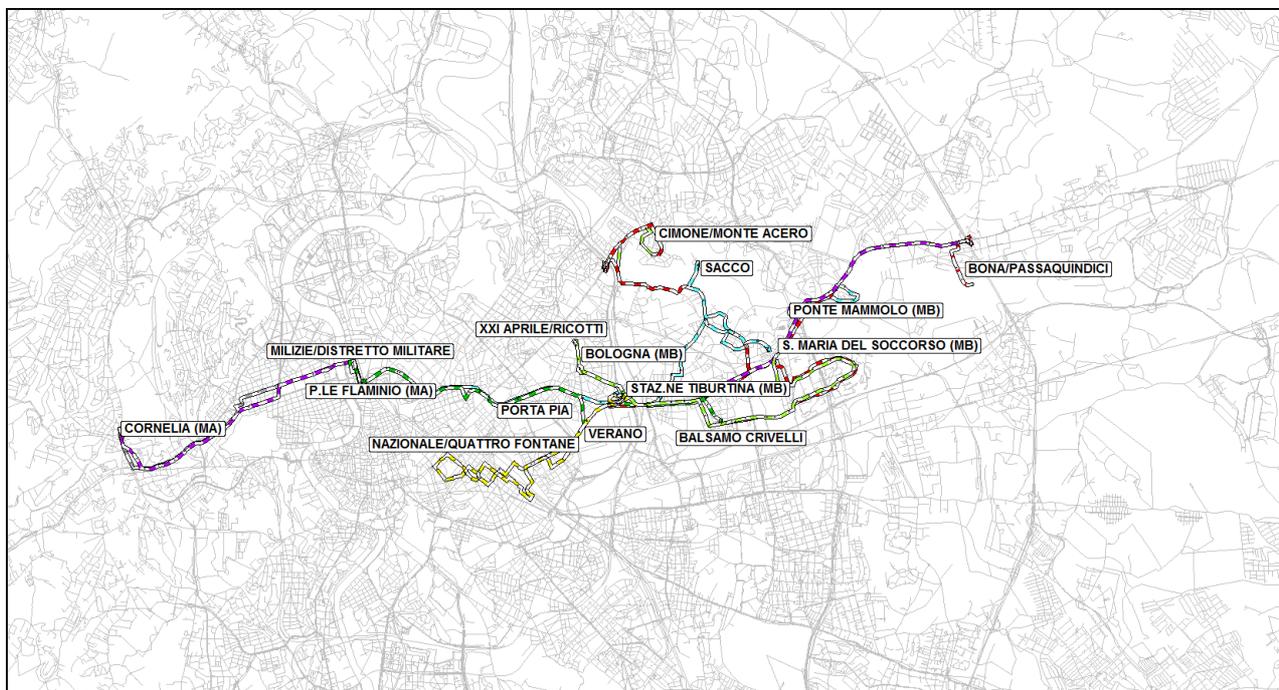
Come si può facilmente dedurre dalla tabella succitata, i valori impiegati per rappresentare i veicoli sono valori mediati su alcune tipologie di veicoli reali. In particolare il consumo specifico per i veicoli IC è stato riportato in kWh/km per essere omogeneizzato con quello dei veicoli BEV, tramite l'equivalenza chimica del gasolio da trazione (12,72 kWh/kg).

#### 2.4.2 Descrizione del bacino Tiburtina

Il primo caso di studio analizza dieci linee all'interno di un bacino semiperiferico, nella zona intorno alla stazione Tiburtina, nel quadrante est della città di Roma. Le linee sono state selezionate tentando di coprire ogni tipologia di servizio (di penetrazione, di adduzione a grandi nodi, di distribuzione etc.). Il dettaglio delle linee selezionate ed i relativi percorsi sono riportati rispettivamente in Tabella 7 e in Figura 1.

**Tabella 7. Dettaglio delle linee del bacino Tiburtina.**

Linee	Fermate	Lunghezza di giro [km]	Domanda oraria [pass/ora]	Distanza media tra le fermate [m]	Velocità commerciale [km/h]
111	32	8,24	198	258	15,97
163	38	12,704	1236	334	16,11
211	56	16,864	501	301	17,27
309	65	17,04	712	262	16,57
441	22	5,12	44	233	17,72
443	51	17,776	222	349	17,78
448	20	4,576	485	229	14,91
490	71	21,872	905	308	14,53
491	36	10,816	764	300	13,92
71	41	11,872	630	290	14,93
<b>Totale</b>	<b>432</b>	<b>126,88</b>	<b>~ 5 700</b>	<b>286</b>	<b>15,97</b>



**Figura 3. Linee semi-periferiche del bacino Tiburtina**

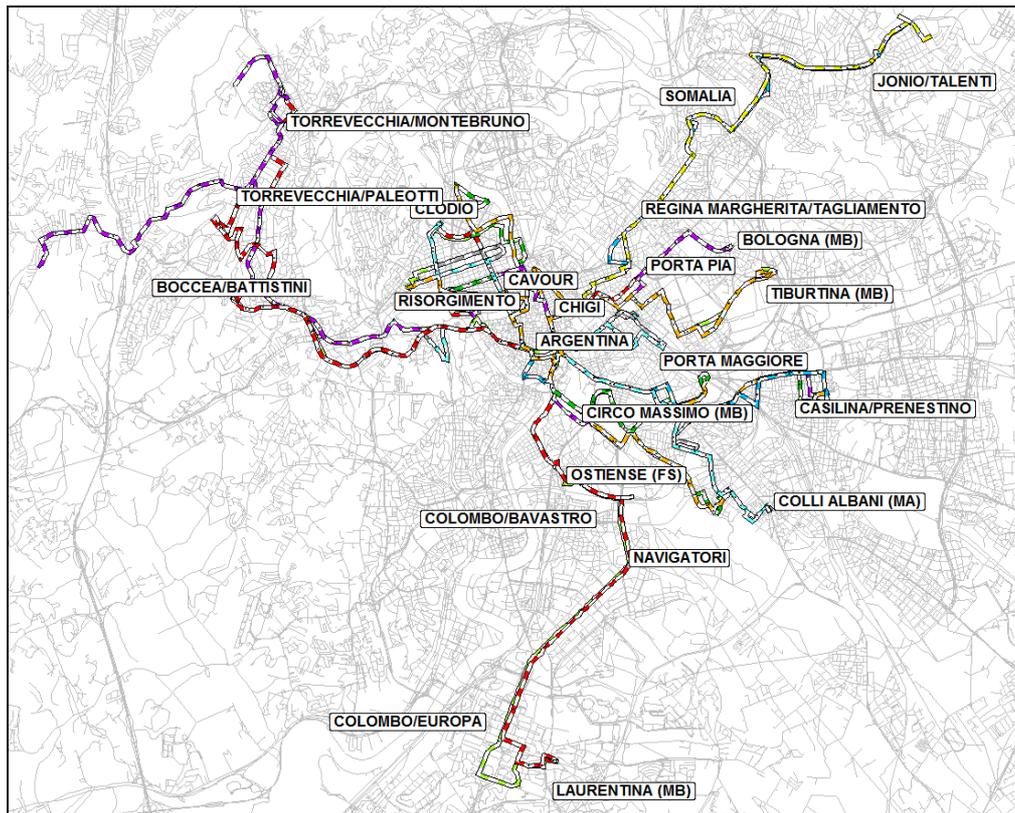
### 2.4.3 Descrizione del bacino Centro storico

L'estensione del progetto all'area centrale della rete bus di Roma è stata effettuata considerando il bacino del Centro storico gravitante sulla fermata di Largo Torre Argentina; su questa fermata, terminale della linea tranviaria 8, transitano 15 linee ad elevata frequenza; il bacino è dunque adatto ad uno stress test dei

veicoli elettrici a batteria. La procedura seguita è identica a quella applicata al bacino Tiburtina. Per brevità, dunque, si riporteranno solamente i risultati ed i relativi confronti.

Per selezionare le linee da studiare si è proceduto per aggregazione delle fermate. Si sono scelte tutte le linee transitanti per il nodo di Largo Torre Argentina, avendo osservato che queste coprono un'area piuttosto vasta della Capitale.

Come si può osservare dalla Tabella 8, le caratteristiche delle linee del bacino centrale sono piuttosto differenti dalle precedenti. Infatti, presentano il doppio delle fermate e quasi il triplo della domanda oraria nelle ore di punta.



**Figura 4. Linee centrali del bacino Centro storico**

**Tabella 8. Dettaglio delle linee del bacino Centro storico.**

Linee	Fermate	Lunghezza di giro	Domanda oraria	Distanza media tra le fermate	Velocità commerciale
	N.	[km]	[pass/ora]	[m]	[km/h]
119	19	5,44	185	286	13,39
30	41	34	968	829	19,68
40	19	9,13	2176	481	8,27
46	79	23,41	1273	296	26,02
492	74	24,68	898	334	13,95
571	49	16,42	484	335	13,73
62	52	15,94	957	307	11,62
628	72	23,35	937	324	14,18
63	84	30,91	653	368	19,50
64	37	11,42	1518	309	15,12
70	55	16,49	1071	300	13,57
81	85	25,01	667	294	14,17
810	59	17,55	612	297	12,80
87	63	21,18	972	336	15,95
916	44	29,32	605	666	14,92
<b>Totale</b>	<b>832</b>	<b>304,25</b>	<b>13 976</b>	<b>384</b>	<b>15,12</b>

#### 2.4.4 Pianificazione degli scenari di offerta

Dopo aver individuato l'ambito di studio, si è proceduto alla pianificazione degli scenari. Questi si differenziano per numero di linee operate tramite veicoli BEV, per schema di funzionamento (ricarica ai depositi e ricarica rapida plug-in ai capilinea, o ricarica ultra-rapida a contatto strisciante alle fermate mediante ultracapacitori) ed infine per parametri di esercizio (tempi di sosta alle fermate ed ai capilinea, potenza della ricarica e capacità della batteria). Il dettaglio di queste variabili è riportato nella Tabella 8. Si assumono 6 tipi di scenario: BAU, A, As, B, C e GA. Questi rappresentano rispettivamente: la situazione attuale; la ricarica rapida ad un numero variabile di fermate in funzione delle esigenze di consumo con differenti potenze degli ultracapacitori elettrici (A e As); la ricarica rapida in numero pari alla metà delle fermate disponibili (B); la situazione con ricarica ai soli capilinea e depositi (C); lo scenario a variabili ottimizzate tramite algoritmo genetico (GA). Si è realizzata questa varietà di scenari per consentire di esplorare tutte le possibilità di impiego di un sistema elettrico con veicoli a batteria.

Come evidenziato in Tabella 9, le grandezze rilevanti nella programmazione degli scenari sono:

- $B_k$  : Capacità della batteria impiegata sul veicolo;
- $W_f, W_z$  : Potenza media dei dispositivi di ricarica alle fermate f e ai capilinea z;
- $T_{f_i}$  : Tempo medio di sosta necessario alla ricarica alle fermate f e ai capilinea z;
- $N_{fa}$  : Numero complessivo di fermate attrezzate sull'intero bacino.

Per tenere conto dell'incidenza della capacità della batteria sul peso dei pacchi batteria e quindi sui consumi energetici specifici per km, utilizzando i dati pubblicati nelle diverse applicazioni sperimentali di autobus elettrici a batteria di ioni di litio o con supercapacitori, si è ricavata una relazione empirica, che fornisce il valore di un coefficiente  $\beta$  moltiplicativo del consumo in funzione della capacità della batteria:

$$\beta = 0.0057 \cdot B_k + 0.9784 \quad (14)$$

Tabella 9. Dettaglio degli scenari.

Classe scenario	ID Scenario	Linee BEV	Bk [kWh]	Wf [kW]	Wz [kW]	Tf [s]	Tz [min]	Nfa [numero]	Ricarica notturna ai depositi [-]	$\beta$ [-]
BAU	0	0	0	0	0	30	10	0	no	-
A	1	4								
A	2	7	15	200	100	30	10	var	no	1,0639
A	3	10								
As	4	4								
As	5	7		250	120	40	10	var	no	1,1209
As	6	10								
B	1	4								
B	2	7	15	200	100	30	10	nfj/2	no	1,0639
B	3	10								
C	1	4								
C	2	7	100	0	100	30	var	0	sì	1,5484
C	3	10								
GA	1	4								
GA	2	7	var	var	var	var	var	var	no	var
GA	3	10								

## 2.5 Risultati

La presentazione dei risultati ottenuti dall'applicazione del modello di calcolo dei costi e dei consumi e della relativa procedura di ottimizzazione è organizzata nella maniera seguente. Sono dapprima presentati i risultati dell'applicazione del modello agli scenari individuati nel par.2.4.4 per il bacino Tiburtina applicando tradizionali pratiche di buona ingegneria, consistenti nella applicazione per tentativi di differenti ipotesi di dimensionamento delle variabili di progetto (numero di linee elettrificate, tipologia e potenza dell'impianto di ricarica, capacità della batteria, numero di fermate attrezzate per la ricarica ultrarapida, esistenza della ricarica rapida plug-in ad uno o ad entrambi i capolinea, ricarica notturna ai depositi, tipologia e numero di veicoli necessari, in funzione dei tempi di ricarica necessari e della capacità del mezzo rispetto alla domanda nel periodo di punta).

Una volta individuate le tipologie di scenario più promettenti per il bacino Tiburtina, si è proceduto a ricercare un affinamento della soluzione applicando l'algoritmo genetico descritto nel par.2.2. La presentazione dei risultati consente di apprezzare le prestazioni di convergenza dell'algoritmo e la sua efficacia nel migliorare la soluzione iniziale.

Nel successivo par.2.5.3, vengono presentati i risultati ottenuti a seguito dell'applicazione del metodo di calcolo e progettazione al bacino del Centro storico, centrato sul largo di Torre Argentina. Poiché la procedura applicata è identica rispetto al caso precedente, vengono omesse la descrizione del metodo e la presentazione dei risultati intermedi e vengono presentati direttamente i risultati numerici ottenuti.

Una volta dimensionati flotta ed impianti di ricarica alle fermate, vengono calcolati i consumi complessivi di ciascun bacino ai fini della stima del fabbisogno elettrico ed alla conseguente verifica della rete elettrica e del sistema di sottostazioni. A tali fini, occorre conoscere l'andamento temporale dei consumi e la localizzazione dei punti di ricarica. Il fabbisogno viene quindi disaggregato nel tempo (per fascia oraria) e nello spazio, mediante assegnazione delle linee ai capolinea. I risultati sono presentati rispettivamente nei par.2.5.4 e 2.5.5.

### 2.5.1 Valutazione iniziale degli scenari per il bacino Tiburtina

La valutazione iniziale degli scenari, come detto, viene effettuata applicando agli scenari individuati nel par.2.4.3 metodi pratici di buona ingegneria per dimensionare le variabili di progetto:

- Numero delle fermate equipaggiate con dispositivo di ricarica ultra-rapida a contatto strisciante (nfaj);
- Consistenza della flotta impiegata su tutte le linee (nK),
- Consumo giornaliero di energia elettrica (ECd);

Una volta definite le caratteristiche dell’offerta, viene applicato il modello tecnico-economico per il calcolo dei consumi energetici e dei costi interni ed esterni del sistema di trasporto nell’intera vita utile dei veicoli e degli impianti, assunta pari a 15 anni. Nel dettaglio, vengono calcolati:

- Costo ambientale attualizzato su quindici anni di esercizio (NPCA);
- Costo di energia attualizzato su quindici anni di esercizio (NPCE);
- Costo di investimento per acquisto di veicoli e dispositivi elettrici (CI);
- Costo di manutenzione attualizzato su quindici anni di esercizio (NPCM);
- Costi di rumore attualizzati su quindici anni di esercizio (NPCN);
- Costo di personale attualizzato su quindici anni di esercizio (NPCP);
- Costo dell’utenza attualizzato su quindici anni di esercizio (NPCU);

Nella tabella 10 sono riportati, nella parte alta, i valori numerici delle variabili di progetto, e, nella parte bassa, gli output, in forma monetaria, del modello di simulazione per gli scenari A ed As introdotti nella Tabella 9.

**Tabella 10. Risultati e confronti tra scenari A e As, definiti nella Tabella 9, con lo scenario BAU.**

Scenario Indicatore	Unità	BAU	A			As		
		–	1	2	3	4	5	6
nfa	[fermate attrezzate]	0	12	48	103	6	29	56
nK	[veicoli]	95	91	91	97	100	100	106
ECd	[kWh/giorno]	0	3 305	15 711	41 172	3 482	15 711	43 378
NPCA	[M€]	12,531	11,576	10,655	1,945	11,576	10,655	1,945
NPCE		60,462	56,24	41,311	11,169	56,513	41,311	12,104
CI		20	26,665	34,095	47,585	27,554	35,835	48,866
NPCM		1,114	1,429	1,899	2,651	1,535	1,996	2,722
NPCN		8,805	7,936	5,334	0,146	7,936	5,334	0,146
NPCP		147,493	143,31	143,31	153,34	157,1	157,1	167,13
NPCU		3 423,7	3 570,9	3 570,9	3 315,5	3 570,9	3 570,9	3 315,5
<b>NPC</b>		<b>250,41</b>	<b>247,16</b>	<b>236,61</b>	<b>216,84</b>	<b>262,22</b>	<b>252,24</b>	<b>232,91</b>

Come si può facilmente osservare dalla tabella, l’utilizzo di scenari con un maggior numero di linee eserciti con veicoli BEV in questa configurazione – ossia A3 e As6 – comporta un risparmio netto di circa il 14 % nei costi totali attualizzati su quindici anni di esercizio. Questa riduzione è giustificata da una drastica riduzione nei costi esterni (ambientali e di rumore) e nei costi di energia. Com’era intuibile, tuttavia, i costi d’investimento per l’acquisto di veicoli elettrici e delle relative apparecchiature sono molto elevati, ed è questo il motivo per cui il risparmio si manifesta solo su un’analisi pluriennale.

Analoghe considerazioni valgono anche per gli scenari B e C. In Tabella 11 si riportano i confronti tra queste due tipologie di scenario e la situazione attuale, tenendo presente che gli scenari B prevedono la ricarica ultra-rapida ad un numero di fermate pari alla metà di quello totale, mentre gli scenari C non considerano la possibilità di ricarica ultra-rapida, ma solo la cosiddetta configurazione di biberonage, ossia il reintegro dell’energia consumata durante la corsa ad un solo capolinea per ciascuna linea. Quest’ultima configurazione potrebbe sembrare conveniente dal punto di vista degli investimenti poiché si azzerano le

apparecchiature in linea. Tuttavia, per le linee il cui tempo di ricarica eccede l'intertempo, è necessario acquistare nuovi veicoli per mantenere la frequenza e questo implica un aumento dei costi tale da annullare il beneficio precedentemente ottenuto.

**Tabella 11. Risultati e confronti tra gli scenari B e C definiti nella Tabella 9, con lo scenario BAU.**

Scenario Indicatore	Unità	BAU	B			C		
		–	1	2	3	1	2	3
nfa	[fermate attrezzate]	0	63	130	218	0	0	0
nK	[veicoli]	95	91	91	97	93	101	122
ECd	[kWh/giorno]	0	3 305	15 711	41 172	4 810	22 866	59 921
NPCA	[M€]	12,531	11,576	10,655	1,945	11,576	10,655	1,945
NPCE		60,462	56,268	41,572	12,016	57,113	45,622	22,357
CI		20	28,215	38,195	53,335	23,367	36,364	53,403
NPCM		1,114	1,571	2,128	2,971	1,909	2,633	3,867
NPCN		8,805	7,936	5,334	0,146	7,936	5,334	0,146
NPCP		147,493	143,31	143,31	153,34	145,82	157,94	193,04
NPCU		3 423,7	3 570,9	3 570,9	3 315,5	3 570,9	3 570,9	3 315,5
<b>NPC</b>		<b>250,41</b>	<b>248,88</b>	<b>241,2</b>	<b>223,76</b>	<b>242,88</b>	<b>248,77</b>	<b>266,78</b>

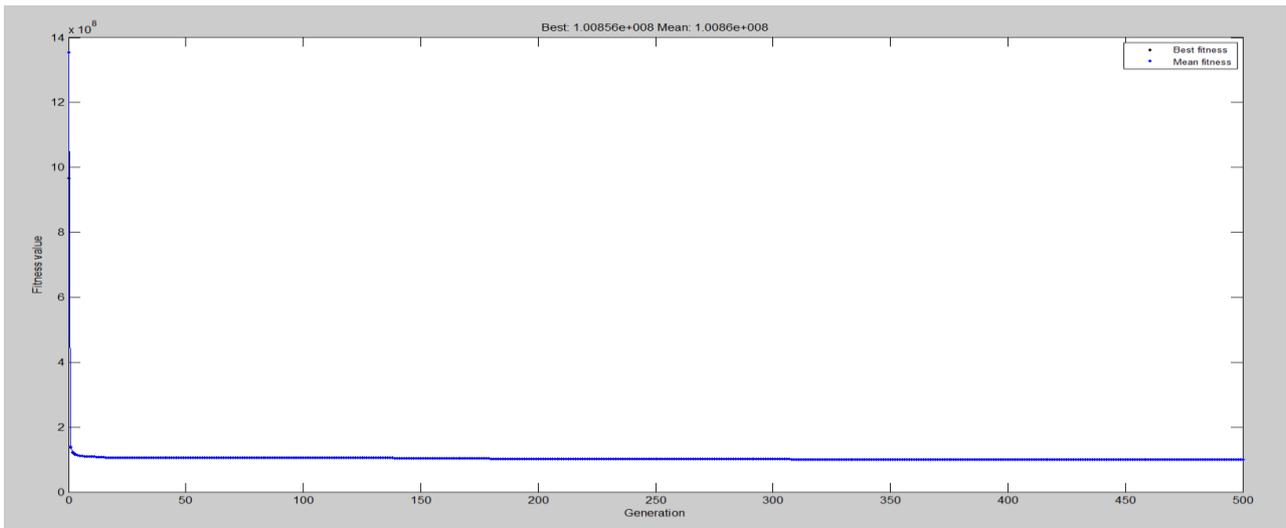
Come è facile osservare dalla Tabella 11, il trend di costo nell'aggiunta delle linee equipaggiate con veicoli BEV è inverso tra la classe B e la classe C: all'aumentare del numero delle linee attrezzate con lo scenario di classe B il costo globale si riduce, in virtù del risparmio ottenuto su un maggior numero di linee; diversamente, lo scenario di classe C rileva un costo crescente con l'aumento delle linee BEV a causa del maggior numero di veicoli da acquistare. Questa è la motivazione principale per la quale si è scelto di operare un'ottimizzazione tramite algoritmo genetico sui soli scenari che prevedono la ricarica ultra-rapida alle fermate, nell'ipotesi di esercizio con veicoli elettrici su 4, 7 o 10 linee.

### 2.5.2 Risultati dell'ottimizzazione per il bacino Tiburtina

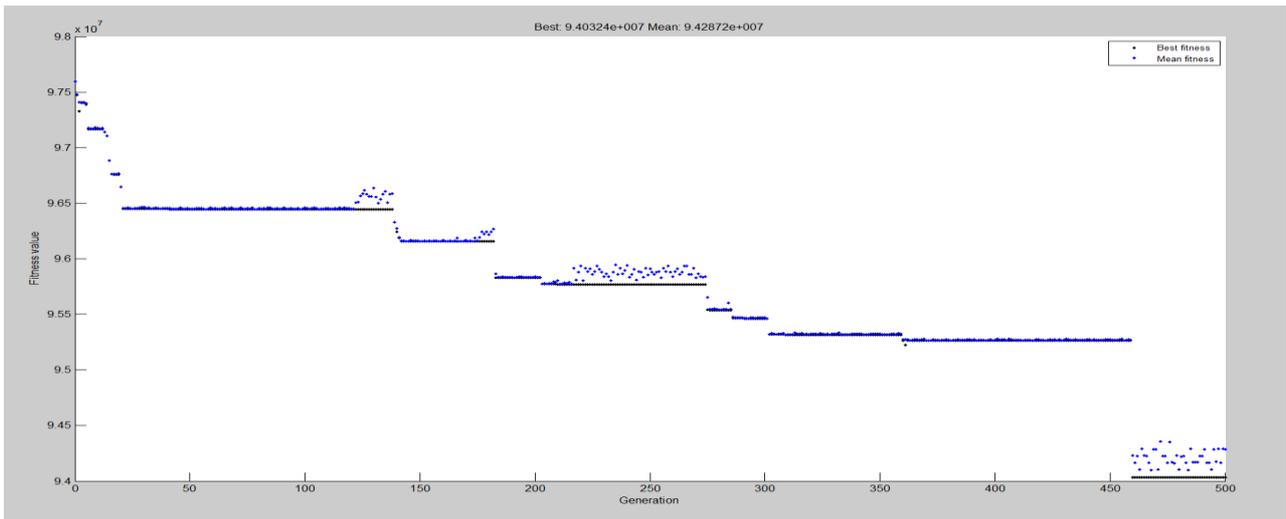
Avendo stabilito tutti i criteri ed i parametri dell'ottimizzazione come riportato nei paragrafi precedenti, si sono ottenuti i seguenti risultati nelle diverse iterazioni.

**Tabella 12. Valori delle variabili di progetto e fitness nel punto finale nelle cinque iterazioni.**

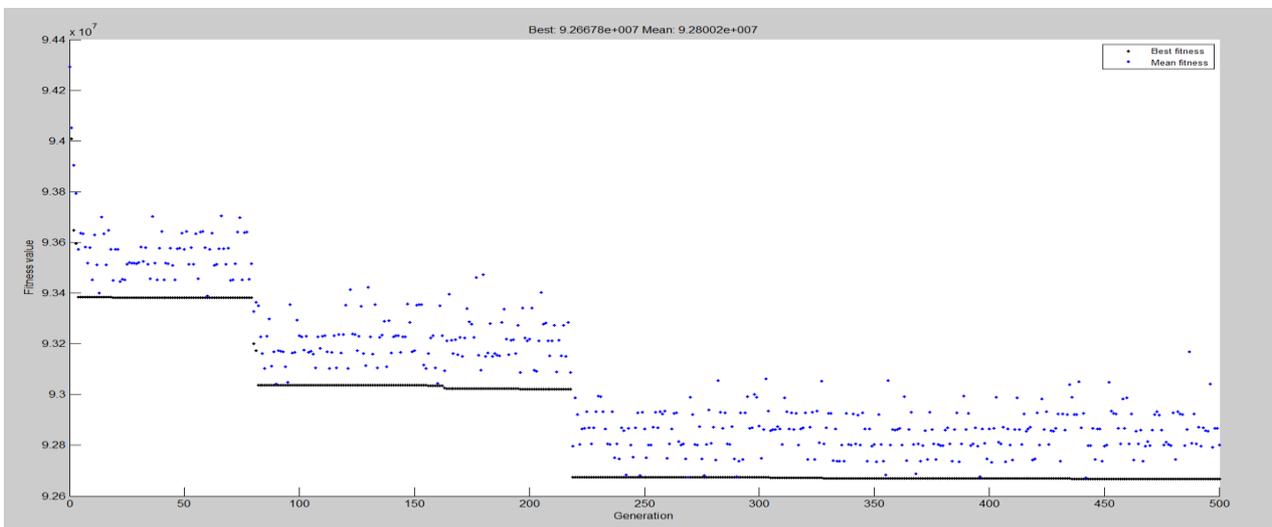
	Fitness	Punto iniziale					Punto finale				
		B <sub>k</sub>	w <sub>f</sub>	w <sub>z</sub>	T <sub>f</sub>	T <sub>z</sub>	B <sub>k</sub>	w <sub>f</sub>	w <sub>z</sub>	T <sub>f</sub>	T <sub>z</sub>
1 <sup>a</sup> iter	10,085571	0	0	0	0	0	3.5	126	40	33	317
2 <sup>a</sup> iter	0,9795026	3.5	126	40	33	317	16.5	121	48	22	594
3 <sup>a</sup> iter	0,9776359	16.5	121	48	22	594	9.4	114	49	23	594
4 <sup>a</sup> iter	0,9403242	9.4	114	49	23	594	10.2	135	61	21	600
5 <sup>a</sup> iter	0,9266778	10.2	135	61	21	600	11.6	148	70	22	600



**Figura 5. Andamento della fitness nella prima iterazione di applicazione dell’algoritmo genetico (ricerca di una soluzione fattibile)**



**Figura 6. Andamento della fitness nella quarta iterazione di applicazione dell’algoritmo genetico (ottimizzazione delle soluzioni migliori)**



**Figura 7. Andamento della fitness nella quinta iterazione di applicazione dell’algoritmo genetico (dispersione delle soluzioni e senza miglioramento delle soluzioni migliori)**

Come mostrano le figure precedenti, la prima iterazione è servita a cercare un punto iniziale da assegnare al problema, mentre le successive hanno migliorato la prima soluzione trovata. I punti blu nelle figure indicano la media dei valori della fitness, mentre quelli neri la soluzione migliore. Come è facilmente intuibile dalla Figura 7 una maggior dispersione dei valori della fitness media, indica una crescente difficoltà nel rintracciare una soluzione che sia migliorativa rispetto a quella precedente, ed è questo il motivo per cui, in taluni casi, la media aumenta. È stato preso questo come criterio per decidere l’arresto della procedura alla quinta iterazione.

Come risultato dell’ottimizzazione si è proceduto in un modo analogo al precedente, ossia facendo girare il modello di calcolo delle voci di costo e del funzionamento dell’esercizio con il punto finale della quinta iterazione ottenendo i seguenti risultati, per gli scenari identificati con i numeri 1, 2 e 3, corrispondenti rispettivamente all’introduzione di 4, 7 e 10 linee elettriche.

Come si può osservare dalla Tabella 13, gli scenari ottimizzati tramite algoritmo genetico sono tutti migliori della situazione BAU e, inoltre, la convenienza complessiva aumenta al crescere delle linee elettriche, come evidenziato dalla riduzione valore attuale netto (NPC) passando dallo scenario di riferimento (BAU) allo Scenario 1 e poi allo Scenario 3.

**Tabella 13. Risultati degli scenari ottimizzati.**

Scenario Indicatore	Unità	BAU	GA		
		–	1	2	3
nfa	-	0	29	104	216
nK	[veicoli]	95	85	85	91
ECd	[kWh/giorno]	0	3 245	15 425	40 422
NPCA		12,531	11,576	10,655	1,945
NPCE		60,462	56,106	41,082	10,762
CI		20	24,788	34,389	49,717
NPCM	[M€]	1,114	1,381	1,915	2,769
NPCN		8,805	7,936	5,334	0,146
NPCP		147,493	133,29	133,29	143,31
<i>NPCU</i>		<i>3 423,7</i>	<i>3 560,1</i>	<i>3 560,1</i>	<i>3 305,2</i>
<b>NPC</b>		<b>250,41</b>	<b>235,07</b>	<b>226,66</b>	<b>206,66</b>

In conclusione, i risultati sono riassunti graficamente nella Figura 8, che illustra le soluzioni relative all’introduzione di veicoli elettrici su tutte le 10 linee del bacino Tiburtina, per i diversi scenari di introduzione di veicoli elettrici con ricarica rapida plug-in ai capolinea (scenario C3) o con ricarica ultra-rapida alle fermate mediante contatto strisciante (Scenario A3, con dimensionamento dei parametri mediante metodi di buona ingegneria, e scenario GA3, con ottimizzazione delle variabili mediante dell’algoritmo genetico). Nella figura si riporta un confronto tra lo scenario BAU e gli scenari di esercizio di tutte le linee con veicoli elettrici, caratterizzati dall’indice 3.

I risultati sono mostrati separatamente per i costi degli utenti e gli altri costi, aziendali e ambientali. I primi, infatti, riportati su un orizzonte temporale di 15 anni hanno un ordine di grandezza di differenza e finirebbero per distorcere il confronto.

Come si può osservare dal grafico la riduzione nel costo per l’utenza è presente in tutti gli scenari BEV e questo è giustificabile dal fatto che, essendo questa voce calcolata come il prodotto del valore monetario del tempo moltiplicato per il tempo di attesa dell’utenza alle fermate, negli scenari elettrici si riscontra un incremento della frequenza per quelle linee servite attualmente da mezzi da 18 metri autosnodati, che

sono stati sostituiti da mezzi BEV più piccoli e dunque con una frequenza più elevata. Per quanto riguarda i costi per l'azienda, si riscontra una diminuzione considerevole in alcuni scenari BEV, ma non in tutti. Ad esempio gli scenari di classe C, che non prevedono la ricarica rapida alle fermate, hanno un costo complessivo più elevato a causa della maggiore cospicuità della flotta. Tale aumento è stimabile intorno al 5% rispetto alla situazione attuale, sulla base di quindici anni di esercizio. Per quanto riguarda gli scenari con ricarica rapida alle fermate si può osservare, invece, una riduzione dei costi complessivi (esclusi i costi degli utenti) rispetto alla situazione attuale di circa il 14% per quanto riguarda la classe di scenari A e del 17% a valle dell'ottimizzazione.

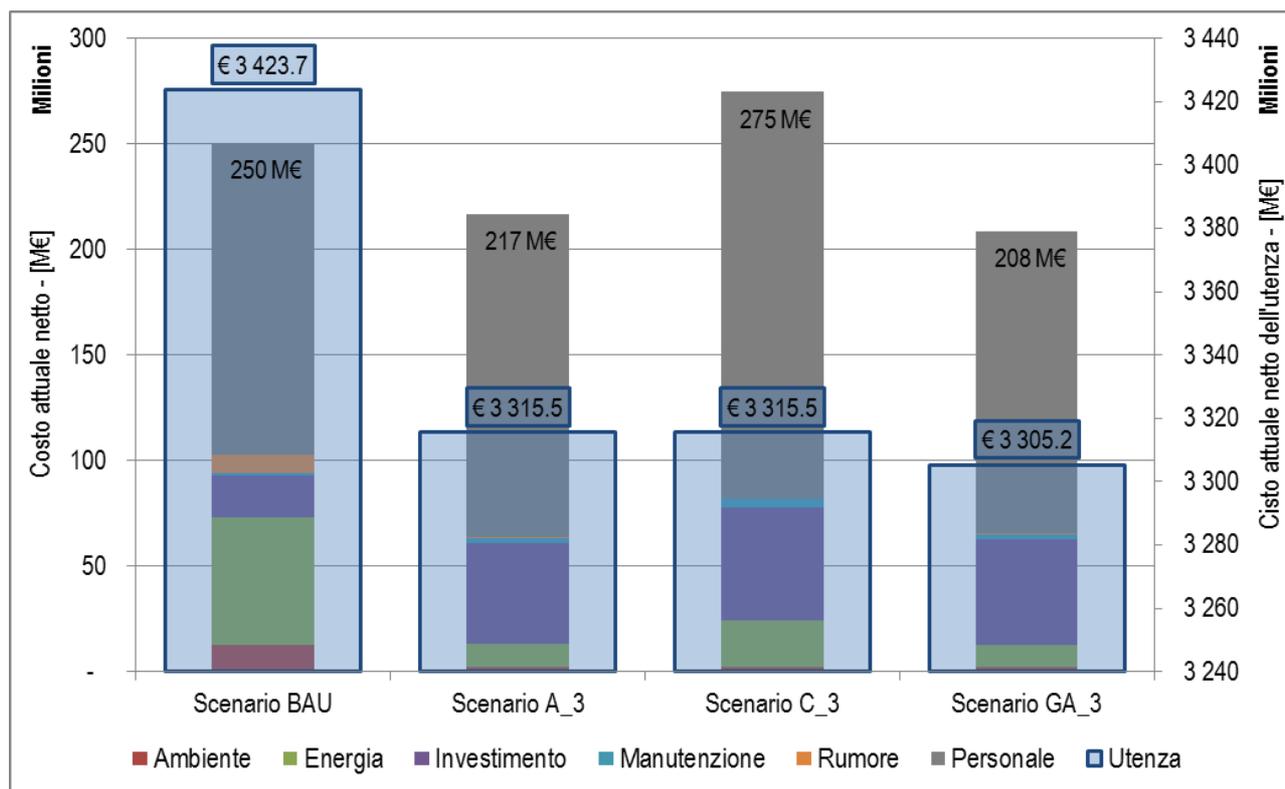


Figura 8. Confronto dei costi attuali complessivi netti per gli scenari di progetto e nello scenario di riferimento (Bacino Tiburtina).

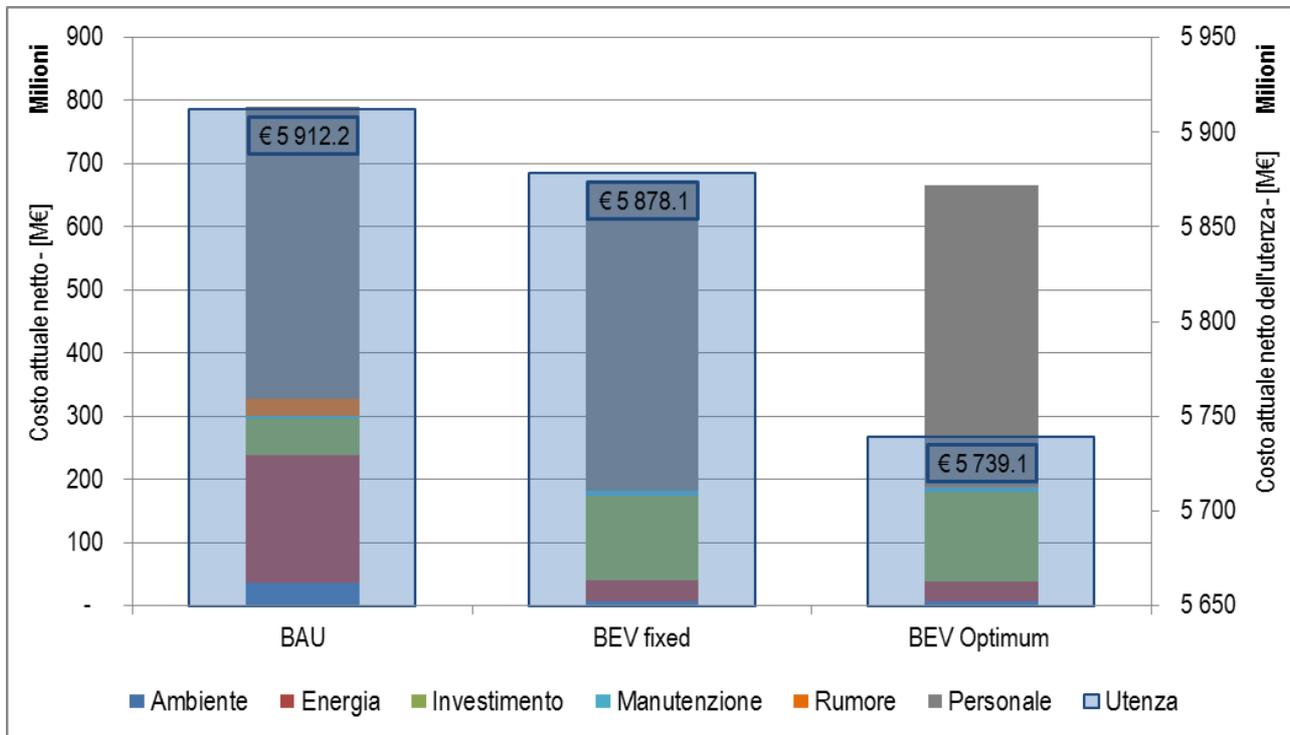
### 2.5.3 Risultati dell'ottimizzazione per il bacino Centro Storico

Nel seguito si riportano le caratteristiche degli scenari ed i relativi risultati, tenendo presente gli output dell'area di studio precedente. Ciò significa che sono stati considerati ai fini del confronto solamente gli scenari che erano risultati più convenienti.

Tabella 14. Dettaglio degli scenari per il bacino Centro Storico.

Classe	ID	Linee BEV	Bk	Wf	Wz	Tf	Tz	Nfaj	Ricarica notturna ai depositi	$\beta$
scenario	Scenario		[kWh]	[kW]	[kW]	[s]	[min]	[stops]	[-]	[-]
BAU	0	0	0	0	0	30	10	0	no	0.9784
A	3	15	15	200	100	30	10	var	no	10.639

GA	3	15	8.4	126	53	27	580	var	no	10.263
----	---	----	-----	-----	----	----	-----	-----	----	--------



**Figura 9. Confronto dei costi attuali complessivi netti per gli scenari di progetto e nello scenario di riferimento (Bacino Centro storico).**

Parimenti a quanto riscontrato nel bacino Tiburtina, anche per le linee centrali si nota una forte riduzione nei costi dell'utenza, e questo è dovuto ad un aumento della flotta in talune linee. Per quanto concerne i costi netti complessivi (esclusi quelli dell'utenza), si visualizza un risparmio di circa il 18% dallo scenario attuale per entrambi gli scenari BEV.

#### 2.5.4 Andamento orario degli assorbimenti elettrici nei due bacini di studio

A conclusione del lavoro è stata svolta un'analisi, con l'inevitabile approssimazione insita nel livello di prefattibilità dello studio, sui consumi elettrici e sulle potenze impegnate. Giacché durante le ore di esercizio la domanda varia notevolmente, ed essendo la frequenza calcolata in base alla domanda, si ha anche una forte variazione dei veicoli in circolazione. Questo implica chiaramente un diverso consumo di energia durante l'arco della giornata. Discretizzando per ciascuna fascia oraria la frequenza ed eseguendo il calcolo dei consumi elettrici come segue

$$EC_h = \sum_{j=1}^J ec_j L_j f_j^h \quad (15)$$

essendo:

- $EC_h$ : consumo energetico orario [kWh/h];
- $ec_j$ : consumo energetico specifico su ogni linea [kWh/km];
- $L_j$ : lunghezza della corsa sulla linea j;
- $f_j^h$ : frequenza sulla linea j nella fascia oraria h.

I risultati dell'analisi sono illustrati nelle Figure 10 e 11, rispettivamente per il bacino Tiburtina (nello scenario di 10 linee esercite con veicoli elettrici) e per quello di Torre Argentina. Come si può osservare piuttosto agevolmente i consumi energetici sono piuttosto elevati durante le ore di punta, aggirandosi intorno a 1580 e 3500 kWh/h rispettivamente per il bacino Tiburtina e per quello di Torre Argentina. Si notano altresì variazioni piuttosto sensibili all'interno delle ore di maggiore carico (7-18). Questa variazione è riscontrabile in maniera leggermente maggiore per le linee periferiche, poiché esse saranno più soggette alle fluttuazioni della domanda che richiede il servizio da e per il centro.

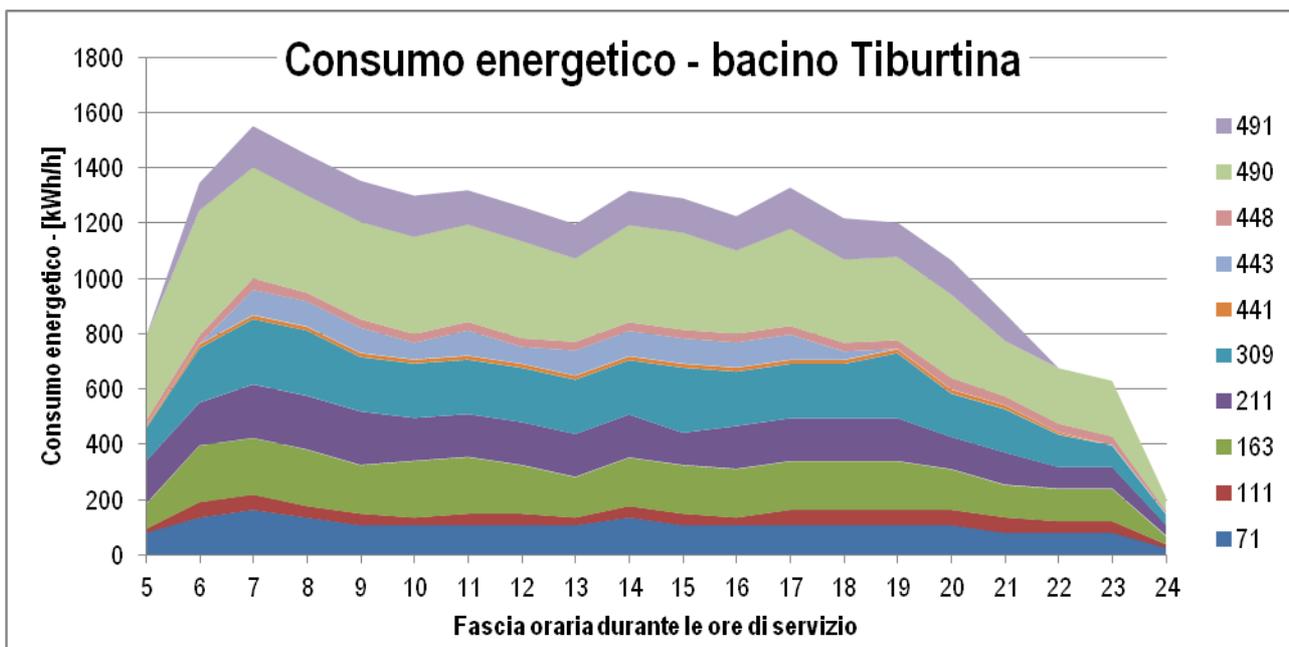


Figura 10. Andamento orario del consumo energetico complessivo degli autobus elettrici nel bacino Tiburtina.

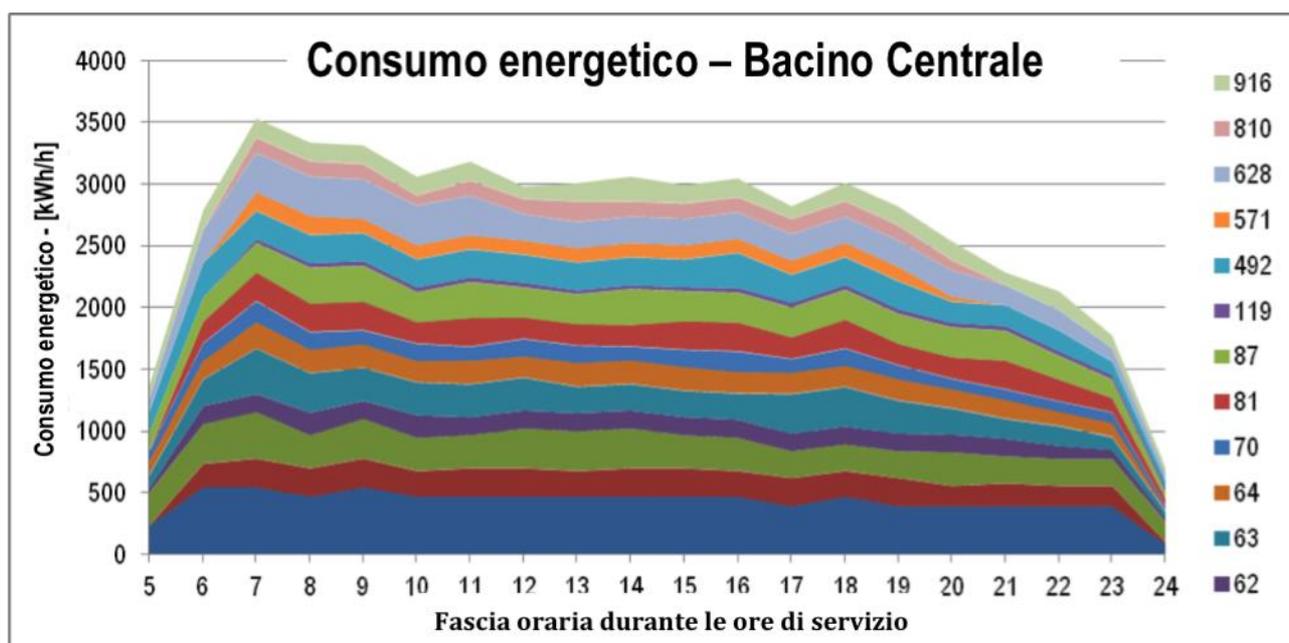


Figura 11. Andamento orario del consumo energetico complessivo degli autobus elettrici nel bacino Centro storico.

### 2.5.5 Stima delle potenze assorbite alle sottostazioni

Un altro indicatore importante per il corretto dimensionamento del sistema elettrico è la potenza assorbita. Questa sarà calcolata in base alla probabilità di arrivi contemporanei alle fermate nel caso in cui, prevedendo arrivi piuttosto frequenti, si installino due o più dispositivi per la ricarica rapida. Più certa è invece la potenza massima assorbita ai capilinea. Allo scopo di individuare il massimo numero di ricariche contemporanee ai capilinea si è proceduto come segue:

$$RD_z = \max_h \left[ \sum_{j \in Z} T_{z,j} f_j^h \right] \quad (16)$$

dove:

- $RD_z$ : numero di dispositivi di ricarica al capolinea  $z$ ;
- $f_j^h$ : frequenza della linea  $j$  nella fascia oraria  $h$ ;
- $T_{z,j}$ : tempo di ricarica del veicolo sulla linea  $j$  al capolinea  $z$ .

Giacché ogni capolinea avrà bisogno di una sottostazione elettrica (SSE), è importante aggregare il massimo numero di linee su ciascun terminal per minimizzare il numero di SSE massimizzandone la potenza e dunque, generalmente, il rendimento. Fermi restando i capilinea attuali delle linee analizzate, e ricordando l'ipotesi fatta di attrezzare un solo terminal per ciascuna linea con dispositivi di ricarica dei veicoli, si è scelto di distribuire gli impianti come riportato nella tabella sottostante.

In totale si prevede di concentrare le linee elettriche su 15 capilinea, i cui assorbimenti variano da un minimo di circa 50kW ad una massimo di 400kW, in corrispondenza della stazione Tiburtina.

**Tabella 15. Assegnazione delle linee ai capilinea e dimensionamento della potenza assorbita dalle sottostazioni.**

Capolinea di ricarica	Linee afferenti al capolinea					Massimo numero di ricariche contemporanee	Stima della potenza assorbita dall'impianto
Balsamo Crivelli	448					1	70 kW
Bologna	62					1	53 kW
Clodio	30	70				3	159 kW
Corso/Popolo	119					1	53 kW
Giulio Cesare/Lepanto	87					1	53 kW
Gregorio VII/Anastasio II	571					1	53 kW
Malatesta	81	810				2	106 kW
Maresciallo Giardino	628					1	53 kW
P.Za Monte Savello	63					2	106 kW
P.Za Venezia	46	916				3	159 kW
S.Maria del Soccorso	309					1	70 kW
Sacco	111	441				2	140 kW
Staz.ne Tiburtina	71	211	490	491	492	6	403 kW
Termini	40	64				4	212 kW
Verano	163	443				3	210 kW

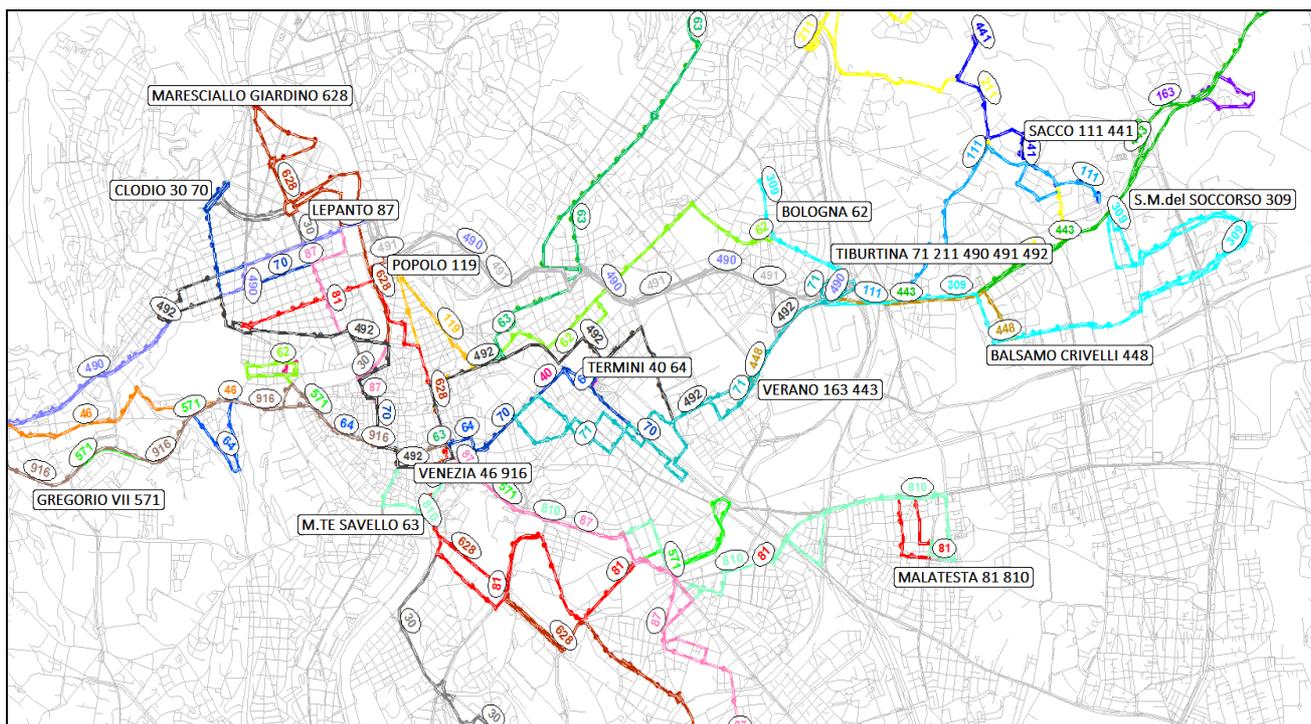


Figura 12. Visualizzazione dei capolinea delle relative linee nel Bacino Centro storico.

### 3 Conclusioni

Il Deliverable ha riportato i risultati dello studio della fattibilità tecnico economica e del fabbisogno energetico conseguente all'elettrificazione di parte della flotta di veicoli stradali per il trasporto pubblico, in due casi di studio, relativi ad due bacini della rete di trasporto pubblico di superficie della città di Roma, gravitanti rispettivamente su via Tiburtina e su largo di Torre Argentina. Per ciascuno dei casi di studio si sono ipotizzati diversi scenari, in funzione della tipologia di esercizio (ricarica rapida alle fermate, ricarica ai soli capilinea), della composizione della flotta (tutte le linee a combustione interna, tutte a trazione elettrica o composizione mista) e dei parametri funzionali (tempi di ricarica, capacità della batteria, potenze di ricarica).

I risultati della ricerca hanno evidenziato come l'elettrificazione della flotta possa produrre una riduzione piuttosto marcata (attorno al 17%) dei costi netti attualizzati su quindici anni di esercizio, in particolar modo per le voci di costo relative all'energia consumata (-80% circa) ed alle emissioni atmosferiche (-85%) ed acustiche (pressoché azzerate). Ovviamente a causa dell'elevato costo dei veicoli elettrici e delle relative apparecchiature i costi d'investimento risultano essere molto maggiori (+150%) della situazione di riferimento, di rinnovo della flotta con veicoli a combustione interna.

L'analisi del fabbisogno energetico nell'arco della giornata ha evidenziato come i consumi siano maggiormente elevati tra le 7 e le 18, con valori massimi di circa 1600 kWh/h e 3500 kWh/h e variazioni del 24% e del 14%, rispettivamente per il bacino Tiburtina e per quello di Torre Argentina.

Lo studio ha anche mostrato come i consumi energetici delle linee bus siano variabili in funzione principalmente dalla domanda da servire. La lunghezza delle linee è un altro parametro di decisione rilevante, ai fini della scelta della tecnologia di ricarica.

Per linee lunghe e con elevata frequenza di passaggio, sarà conveniente il sistema di ricarica ultrarapida alle fermate, potendo ammortizzare l'investimento infrastrutturale su un elevato volume. Infatti, la ricarica ultrarapida alle fermate consente di ridurre significativamente la capacità della batteria, la quale, a sua volta, implicherà un minore consumo specifico ed più breve tempo di sosta per la ricarica ai capilinea. Un ragionamento diverso si può fare per le linee di estensione limitata. Queste si potranno dividere in due gruppi: linee a orario, con frequenza generalmente piuttosto bassa, e linee shuttle, di solito caratterizzate

da intertempi ridotti. Per le prime non c'è ragione di installare sistemi di ricarica alle fermate, in quanto il tempo di sosta al capolinea sarà sufficiente per la ricarica di biberonage richiesta per compiere la corsa. Per le seconde, diversamente, qualora il tempo di ricarica necessario ai capilinea, funzione della lunghezza della corsa, sia tale da richiedere un aumento della flotta per mantenere costante l'intertempo, sarà necessario installare sistemi di ricarica alle fermate per contenere la capacità della batteria e con essa, il peso ed il costo del veicolo. Da queste considerazioni si può individuare un criterio generale per la scelta della soluzione progettuale più indicata alle esigenze di domanda: il primo passo da fare è valutare la lunghezza della linea; qualora essa sia elevata al punto da non ammettere un valore ragionevole della capacità della batteria (al più uguale a 100-120 kWh) sarà opportuno prevedere la ricarica rapida alle fermate. Qualora, invece, la lunghezza della linea della corsa sia bassa, si passa alla seconda variabile discriminante, ossia l'intertempo. Allorquando questo sia più basso del tempo di ricarica ai capilinea si dovrà considerare la possibilità di ricarica rapida alle fermate; diversamente si dovrà procedere al dimensionamento di una soluzione di biberonage, con ricarica ai soli capolinea.

Ai fini del dimensionamento delle sottostazioni di alimentazione elettrica ai capolinea, è stata effettuata un'analisi della potenza assorbita ai capolinea durante la ricarica, ipotizzando di aggregare le linee elettriche in 15 capolinea attrezzati per la ricarica rapida, distribuiti sul territorio, con assorbimenti variabili da 50 kW a 400 kW, in funzione del numero e della frequenza delle linee in attestamento.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. European Commission (2009). "Directive 2009/33/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles". Official Journal L 120 of 15.5.2009.
2. M. Mailbach et al. (2008). "Handbook on estimation of external costs in the transport sector", Delft, 2008.
3. H. Mohring (1976). "Transportation economics". Ballinger, Cambridge, MA, USA.A.
4. Hickman (1999). "Methodologies for Estimating air pollutant Emissions from Transport", Crowthorne, Transport Research Laboratory, UK.
5. EEA (2007). European Environment Agency, EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2007, Technical Report no. 16/2007, Chapter B710, Published December 06, 2007 (latest version).

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

### Acronimi:

BEV: Veicolo elettrico a batteria (Battery Electric Vehicle)

IC: Motore a combustione interna (Internal Combustion)

GA: Algoritmo genetico (Genetic Algorithm)

BAU : Scenario di riferimento (Business As Usual)

### Variabili di progetto:

$B_k$  : Capacità della batteria impiegata sul veicolo

$W_f$  : Potenza media dei dispositivi di ricarica alle fermate  $f$

$W_z$  : Potenza media dei dispositivi di ricarica ai capilinea  $z$

$T_{fz}$  : Tempo medio di sosta necessario alla ricarica alle fermate  $f$  e ai capilinea  $z$

$N_{fa}$  : Numero complessivo di fermate attrezzate sull'intero bacino

$N_{faj}$  : Numero delle fermate equipaggiate con dispositivo di ricarica ultra-rapida a contatto strisciante

$nK$  : Consistenza della flotta impiegata su tutte le linee

### Output:

ECd : Consumo giornaliero di energia elettrica

NPCA : Costo ambientale attualizzato su quindici anni di esercizio

NPCE : Costo di energia attualizzato su quindici anni di esercizio

CI : Costo di investimento per acquisto di veicoli e dispositivi elettrici

NPCM : Costo di manutenzione attualizzato su quindici anni di esercizio

NPCN : Costi di rumore attualizzati su quindici anni di esercizio

NPCP : Costo di personale attualizzato su quindici anni di esercizio

NPCU : Costo dell'utenza attualizzato su quindici anni di esercizio

## 6 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

### **Gaetano Fusco (Responsabile scientifico)**

Ingegnere civile trasporti dal 1990, ricercatore universitario dal 1992, dal 2005 è professore associato di Trasporti presso l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", dove insegna Ingegneria del traffico e Sistemi di trasporto intelligenti. E' esperto tecnico scientifico del MIUR, per conto del quale svolge attività di valutazione dei progetti di ricerca industriale e di base.

E' coordinatore scientifico di numerosi progetti di ricerca nel campo dei trasporti, commissionati da enti pubblici e privati per conto del Dipartimento di Ingegneria, Civile, Edile ed Ambientale e del Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

I suoi interessi scientifici, documentati in oltre 70 pubblicazioni, riguardano la progettazione dei sistemi di trasporto, la regolazione delle reti, la gestione dei sistemi di trasporto e distribuzione delle merci.

### **Adriano Alessandrini**

Ingegnere meccanico dal 1998 e dottore di ricerca in energetica dal 2003, è attualmente Ricercatore presso il CTL – Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza". Svolge, principalmente, attività di ricerca in due settori: il consumo energetico e della produzione di emissioni inquinanti di veicoli e reti di trasporto; i veicoli ed i sistemi di trasporto innovativi. Fra le sue attività vi sono la partecipazione e la conduzione a progetti di ricerca europei, la realizzazione di studi di fattibilità, il rilievo sperimentale di dati sui veicoli e la valutazione dei progetti.

Dal Settembre del 2012 Adriano è coordinatore del progetto Europeo CityMobil2 una delle maggiori iniziative della Commissione Europea per diffondere i sistemi di trasporto a guida automatica non vincolata. Nel Progetto 12 città si contendono 5 dimostrativi.

### **Chiara Colombaroni**

Ingegnere dei sistemi di trasporto dal 2006 e dottore di ricerca in Ingegneria dei Trasporti dal 2011, dal 2006 al 2013 ha collaborato con il Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", dove dal 2011 al 2013 è stata assegnista di ricerca. E' attualmente ricercatrice a tempo determinato presso l'Università di Roma Niccolò Cusano, dove insegna Tecnica ed economia dei trasporti e Tecnologie per il trasporto sostenibile.

La sua attività di ricerca riguarda la macro e micro simulazione dei sistemi di trasporto, la regolazione delle reti, la calibrazione di modelli comportamentali e prestazionali.

### **Federico Giubilei**

Ingegnere dei Sistemi di Trasporto, laureato con lode presso l'Università di Roma "La Sapienza" nel marzo 2013, con una tesi sulla progettazione di linee di trasporto pubblico di superficie con veicoli elettrici. È coautore di una pubblicazione sul "Journal of Transport Literature" dal titolo "Urban Freight by rail". E' titolare di una borsa di studio conferita dal Centro di Ricerca per il Trasporto e la Logistica dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" per una ricerca sui consumi energetici dei veicoli elettrici.