



Ricerca di Sistema elettrico

Valutazione dei benefici ambientali della mobilità elettrica nell'area di Roma

G. Valenti, M. Lelli, C. Liberto, S. Orchi,
G. Messina, F. Ortenzi, F. Carapellucci

VALUTAZIONE DEI BENEFICI AMBIENTALI DELLA MOBILITÀ ELETTRICA NELL'AREA DI ROMA

G. Valenti, M. Lelli, C. Liberto, S. Orchi, G. Messina, F. Ortenzi, F. Carapellucci (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con gli altri vettori energetici

Progetto: Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: Valutazione e valorizzazione dei benefici ambientali della mobilità elettrica

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese - ENEA

Un ringraziamento ai colleghi Antonino Genovese, responsabile del Progetto "Mobilità Elettrica" e Giovanni Pedè, responsabile del Laboratorio STMA, il cui supporto e la costante collaborazione hanno reso possibile la realizzazione dello studio.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 L' APPROCCIO METODOLOGICO	8
2.1 DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI VALUTAZIONE DEI BENEFICI AMBIENTALI	8
2.2 LO STRUMENTO DI CALCOLO DEI CONSUMI E DELLE EMISSIONI	11
2.2.1 <i>Algoritmo di calcolo per i veicoli a trazione termica</i>	12
2.2.2 <i>Altri fattori correttivi considerati</i>	16
2.2.3 <i>La curva dei consumi specifici in funzione della velocità media per l'auto elettrica</i>	16
2.2.4 <i>Algoritmo per il calcolo del consumo dei bus elettrici</i>	18
2.2.5 <i>Il risultato del calcolo</i>	20
3 IL CASO DI STUDIO	21
3.1 IL SISTEMA FCD	22
3.2 LA RETE DI SENSORI FISSI	26
3.3 LA RETE E IL SERVIZIO TPL	27
4 APPROCCIO E RISULTATI DELLA VALUTAZIONE AMBIENTALE	30
4.1 PARAMETRI E PROCEDIMENTO PER IL CALCOLO DEI CONSUMI DI ENERGIA FINALE E PRIMARIA	30
4.2 IL MIX ENERGETICO NAZIONALE PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA	33
4.3 PARAMETRI E PROCEDIMENTO PER IL CALCOLO DELLE EMISSIONI GLOBALI	35
4.4 CONSUMI ED EMISSIONI DEL PARCO AUTO CIRCOLANTE	36
4.5 CONSUMI ED EMISSIONI DEL SERVIZIO TPL SU GOMMA	39
5 VALUTAZIONE DEI COSTI ESTERNI	43
5.1 I COSTI ESTERNI DEL TPL	45
5.2 I COSTI ESTERNI PER IL SETTORE AUTO PRIVATE	52
5.3 I COSTI ESTERNI GENERATI DAL TRASPORTO PUBBLICO E PRIVATO NELLA CITTÀ DI ROMA	60
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	67

Sommario

Il documento riporta l'approccio seguito e i risultati di uno studio condotto per valutare le possibili conseguenze energetiche ed ambientali legate alla diffusione di veicoli elettrici nel parco circolante della provincia di Roma.

Lo studio esamina e confronta due scenari prospettici al 2025 dell'attuale parco circolante di veicoli per il trasporto individuale privato e per il Trasporto Pubblico Locale (TPL) su gomma.

Il primo scenario, meno favorevole nei riguardi della diffusione dei veicoli elettrici ed in linea con gli attuali trend del mercato automobilistico, è configurato ipotizzando un tasso di rinnovo annuo del parco circolante del 5% con auto omologate EURO 6 ed una maggiore penetrazione di auto ibride (circa 2%) e a metano (1,2%) al 2025.

Il secondo scenario ha gli stessi trend di rinnovo del parco circolante e di diffusione di auto ibride e a metano del primo scenario, ma con un'incidenza delle auto elettriche pari al 10% al 2025. Per quanto riguarda il TPL su gomma, in entrambi gli scenari evolutivi è ipotizzato il rinnovo del 30% della flotta al 2025: nel primo con autobus omologati EURO 6, mentre nel secondo unicamente con autobus elettrici.

Lo studio propone un nuovo e diverso approccio per quantificare e caratterizzare la mobilità veicolare sull'intera rete viaria della provincia di Roma. L'approccio proposto utilizza, in particolare, raccolte estese di dati geo-referenziati sugli spostamenti effettuati da un campione di veicoli sonda sul territorio provinciale, nonché dati pubblicati in modalità "Open-Data" sul programma di esercizio e sulla struttura della rete TPL di Roma.

Lo studio applica il modello ECOTRIP sviluppato dall'ENEA per il calcolo dei consumi energetici e delle emissioni dirette a partire dai dati relativi ai percorsi reali o programmati effettuati dai veicoli. Per rendere confrontabili le diverse tecnologie propulsive, lo studio considera, inoltre, il consumo di energia primaria e le emissioni globali includendo nella valutazione l'intera filiera di produzione e distribuzione del vettore energetico, dalla materia prima al serbatoio.

In sintesi, i risultati di questo studio confermano la rilevanza delle auto elettriche nel raggiungimento degli obiettivi di mobilità sostenibile. La parziale elettrificazione del parco auto e della flotta autobus del TPL, prefigurata nel secondo scenario, può contribuire ad una significativa riduzione dell'energia primaria sia rispetto allo scenario attuale (12,3%) che al primo scenario tendenziale (5,3%). Il fabbisogno energetico aggiuntivo necessario a sostenere la parziale elettrificazione del parco circolante è stimato intorno al 3,1% dei consumi complessivi di energia elettrica registrati nel 2015 nella provincia di Roma.

Per quanto riguarda le emissioni di gas climalteranti, i risultati dello studio evidenziano un sostanziale calo del 13,8% rispetto alla situazione attuale e del 7,4% rispetto al primo scenario. Sempre in chiave ambientale i risultati legati alla parziale elettrificazione del parco circolante mostrano un sostanziale abbattimento delle emissioni di sostanze nocive alla salute soprattutto in ambiente urbano.

Infine lo studio quantifica, in termini economici, le esternalità ambientali degli scenari evolutivi del parco circolante. I risultati evidenziano la netta prevalenza degli impatti delle auto private in termini di inquinamento atmosferico e acustico e di riscaldamento globale (circa 97%). La stima delle esternalità per la situazione attuale nella Capitale ammonta a 1 miliardo di euro l'anno, cifra che già con la sostituzione del parco con veicoli a basso impatto ambientale, ridurrebbe del 18% gli impatti generati, mentre l'avvento di veicoli elettrici previsto nel secondo scenario prospettico, determinerebbe ulteriori risparmi del 6% l'anno.

1 Introduzione

L'elettrificazione del parco veicolare circolante (e-mobility) è considerata da più parti come un'alternativa valida per affrontare le difficili sfide poste per una mobilità più sostenibile.

La spinta verso l'e-mobility è dettata in parte dalla necessità di ridurre la dipendenza dai prodotti petroliferi sfruttando il più possibile l'energia proveniente da fonti rinnovabili. Il motore elettrico ha un'efficienza 3-4 volte superiore a quella di un motore termico ed il risparmio di energia primaria di un veicolo elettrico è intorno al 40%. Stime riportate nel Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2016 (RAEE) [1], recentemente pubblicato dall'ENEA, indicano che il parco veicolare circolante nazionale, composto in larga parte da veicoli alimentati con carburanti di origine fossile, ha totalizzato nel 2014 un consumo di circa 35 MTep (milioni tonnellate equivalenti di petrolio), pari a circa il 93% dei consumi del settore dei trasporti.

L'e-mobility è inoltre considerata come la soluzione più promettente per decarbonizzare il trasporto stradale e rispondere alle urgenti sfide poste dai cambiamenti climatici, soprattutto nei paesi alimentati da un mix energetico basato sulle fonti rinnovabili. L'auto elettrica consente, infatti, una riduzione delle emissioni di CO₂ di poco inferiori al 50% rispetto a quelle di un veicolo con una tradizionale alimentazione. Inoltre la riduzione delle emissioni di CO₂ delle auto elettriche potrà essere ancora più consistente con l'atteso sviluppo delle fonti rinnovabili. In Italia il trasporto stradale è, attualmente, responsabile di circa il 28% delle emissioni complessive di CO₂ legate agli usi finali di energia, mentre l'incidenza delle fonti rinnovabili nel mix energetico per la produzione di energia elettrica ammonta a poco più del 17% (RAEE 2016).

L'e-mobility è inoltre la risposta più accreditata alle sempre più pressanti esigenze di riduzione del rumore e delle emissioni di inquinanti atmosferici da traffico che spesso portano le città a raggiungere livelli di inquinamento largamente e sistematicamente superiori ai valori limite e alle soglie di tolleranza fissate dalle norme. Gli inquinanti urbani presenti nell'atmosfera, quali polveri sottili PM₁₀, polveri sottilissime PM_{2,5}, idrocarburi incombusti (HC), monossido di carbonio (CO) e ossidi di azoto (NO_x), sono imputabili all'autotrazione con un'incidenza percentuale sui livelli complessivi di inquinamento ambientale che varia tra il 20% a oltre il 50% a seconda del tipo di inquinante e dell'area in considerazione.

E' noto che l'inquinamento atmosferico rappresenta da molti anni un problema di salute pubblica; le evidenze scientifiche sottolineano infatti l'esistenza di eccessi di rischio sulla mortalità e sulla morbosità della popolazione generale e di individui suscettibili esposti ai livelli di concentrazione degli inquinanti normalmente rilevati nelle aree urbane del nostro paese.

In questo documento sono riportati i risultati dello studio avente per oggetto la valutazione dei benefici ambientali di scenari futuri di diffusione dei veicoli elettrici nell'area metropolitana di Roma. Gli scenari di elettrificazione sono riferiti sia al parco auto circolante nella provincia di Roma, che alle flotte bus impiegate per il servizio di Trasporto Pubblico Locale (TPL) nel Comune di Roma.

Il contributo più rilevante e originale dello studio è quello di fornire stime quantitative a scala provinciale, seppur perfettibili, sul risparmio energetico in termini di energia primaria, sulla riduzione delle emissioni di sostanze nocive e di gas ad effetto serra (anidride carbonica e metano) e sui benefici economici provenienti dalla riduzione delle esternalità ambientali inclusi gli effetti dell'inquinamento acustico.

Lo studio mira pertanto a fornire utili indicazioni sulla riduzione dei costi ambientali dell'e-mobility nelle aree urbane di ausilio e orientamento sia alle Autorità nazionali, che stanno già fornendo indicazioni con il Piano Nazionale infrastrutturale per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica" (PNire) e finanziamenti per la realizzazione della rete di ricarica con il fondo da 50 milioni di euro, sia alle Amministrazioni locali che intraprendono azioni di promozione della mobilità elettrica con politiche di defiscalizzazione dei veicoli elettrici o favorendone l'uso, rispetto alle auto convenzionali, con altre misure (agevolazioni nei parcheggi, accesso alle zone a traffico limitato, uso delle corsie preferenziali, ecc.).

Lo studio fornisce inoltre stime orientative a scala provinciale sul fabbisogno di energia elettrica supplementare e sulle fluttuazioni giornaliere della domanda di energia.

Lo studio è stato affrontato seguendo un approccio metodologico originale ed innovativo in grado di sfruttare dati provenienti da diverse fonti al fine di poter ricostruire e caratterizzare la mobilità veicolare, sia pubblica che privata, nell'area metropolitana di Roma.

L'approccio proposto si basa in particolare sull'utilizzo di raccolte estese di dati geo-referenziati sugli spostamenti effettuati da un campione di veicoli privati (FCD - Floating Car Data) integrate con i conteggi di traffico effettuati dalla rete di spire induttive presenti sulla viabilità romana. I conteggi di traffico hanno permesso di stimare la rappresentatività del campione e quindi di estendere i risultati ottenuti all'intera popolazione entro un livello di fiducia prefissato.

Il vantaggio di utilizzare una consistente collezione di tracce GPS da parte di un campione di veicoli risiede proprio nella possibilità di ricavare una più completa e reale conoscenza dei comportamenti e delle abitudini dei viaggiatori che utilizzano il mezzo privato e di arrivare ad una più specifica caratterizzazione spazio-temporale del traffico cittadino.

L'approccio ha consentito di superare gli attuali limiti di conoscenza della mobilità veicolare determinati dall'alto costo e laboriosità delle indagini sulla domanda di mobilità che ne rendono impraticabile la ripetitività e la continuità nel tempo.

L'analisi delle sequenze di tracce GPS rilasciate da un campione di veicoli ha permesso pertanto la ricostruzione degli effettivi profili di mobilità spazio-temporale dei veicoli all'interno del territorio provinciale e di ottenere una visione di insieme più completa ed estesa in termini di frequenza di utilizzo dell'autovettura, di identificazione dei punti di origine e destinazione dei viaggi, di distanze percorse, di tempi di percorrenza, di durata delle soste e di velocità medie per fasce orarie, per diversi giorni della settimana e mesi dell'anno.

Per l'analisi delle flotte bus, dedicate al servizio di trasporto collettivo dell'intera area metropolitana, l'approccio utilizza il dataset pubblicato in modalità "open data" dall'Agenzia per la Mobilità di Roma. Il dataset del TPL include, in particolare, le linee, i percorsi, gli orari e le fermate che caratterizzano il servizio di trasporto collettivo locale svolto con autobus. Il dataset è stato inoltre integrato con informazioni sul tipo di autobus utilizzato, sui passeggeri trasportati e sulle pendenze delle singole tratte per una stima più accurata dei consumi energetici e delle emissioni di inquinanti.

Per l'analisi degli scenari di mobilità, sia attuale che prospettici con diverse ipotesi di penetrazione dei veicoli elettrici, è stato applicato il software ECOTRIP (Emission and CONsumption calculation software based on TRIP data) sviluppato dall'ENEA. ECOTRIP utilizza come dati di ingresso i percorsi effettivi dei veicoli ricavati dalle sequenze di tracce GPS con le relative informazioni sui tempi e sulle distanze percorse.

L'algoritmo definito ed implementato in ECOTRIP per la stima delle emissioni a caldo degli inquinanti atmosferici è basato sull'EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2013) predisposta dall'Agenzia Europea per l'Ambiente [2]. Per il calcolo delle emissioni a freddo delle auto, l'algoritmo utilizza i metodi riportati nel deliverable 3 del progetto ARTEMIS [3].

Il software ECOTRIP incorpora pertanto un "set" completo di correlazioni matematiche, ricavate sperimentalmente, in cui per ciascuna categoria veicolare il consumo di carburante e i fattori di emissione specifici di ciascun inquinante sono posti in funzione della velocità media del veicolo.

Per l'analisi ambientale degli scenari di diffusione dei veicoli elettrici è stata effettuata una campagna sperimentale di misura su strada e a banco per la caratterizzazione dei consumi di un'auto elettrica di fascia media (Nissan Leaf). La campagna ha permesso di ricavare la correlazione tra consumo e velocità media necessaria per la stima del consumo energetico relativo ai percorsi dei veicoli estratti dalle collezioni FCD.

Per quanto riguarda gli autobus elettrici, sono state utilizzate le curve di consumo specifico ottenute tramite simulazioni effettuate presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila. Le curve sono state determinate per bus di diverse dimensioni, da minibus ad articolati, in funzione della velocità media di percorrenza fra fermate consecutive, del carico trasportato e della pendenza media.

L'analisi della sequenza di viaggi e soste su base annua di un consistente campione di veicoli sonda residenti a Roma ha permesso di verificare l'adattabilità dei veicoli elettrici alle reali esigenze di mobilità, in termini

di percentuale di percorrenze effettuabili in elettrico e di meglio identificare le effettive potenzialità del mercato. L'analisi è stata svolta prendendo in considerazione le prestazioni di un veicolo elettrico di fascia media presente sul mercato in termini di autonomia, consumi specifici e modalità di ricarica durante le soste.

Oltre a questa prima sezione introduttiva il documento consta di 4 sezioni.

La seconda sezione descrive l'approccio metodologico utilizzato per quantificare le ricadute ambientali associate agli scenari di penetrazione di auto e bus elettrici nell'area metropolitana di Roma. La sezione presenta, inoltre, gli algoritmi e la struttura del software ECOTRIP, sviluppato dall'ENEA, per la stima dei consumi energetici e delle emissioni di inquinanti a partire sia dalle tracce GPS rilasciate da un campione di veicoli privati, sia dalle corse programmate relative a ciascuna linea del servizio TPL su gomma di Roma.

La terza sezione è dedicata alla descrizione del caso di studio e dell'insieme dei dati utilizzati per la stima della mobilità veicolare in termini di flussi Origine-Destinazione tra le diverse zone della città, di volumi di traffico sulla rete stradale e di fluttuazioni giornaliere e stagionali. La sezione riporta i risultati delle misure a banco e su strada effettuate con apparecchiatura messa a punto dall'Enea per la caratterizzazione dei consumi delle auto elettriche e la costruzione della curva sperimentale consumi/velocità media di un'auto elettrica di medie dimensioni. La sezione è dedicata inoltre alla descrizione delle curve consumi/velocità ottenute simulando diversi modelli di bus elettrici su profili di missioni reali. La sezione include i risultati delle simulazioni effettuate per stimare quale percentuale delle percorrenze annuali potrebbe essere effettuata con auto elettriche sulla base dell'attuale capacità di accumulo delle batterie e dei consumi specifici associati alle reali condizioni di marcia dei veicoli.

La quarta sezione offre una panoramica sui rendimenti energetici e sui fattori emissivi "well to wheel" (dal pozzo alla ruota) presi in considerazione nel processo di valutazione ambientale. La sezione presenta i risultati delle stime annuali dei consumi e delle emissioni del parco auto circolante e delle flotte bus del TPL. Le stime sono riferite sia alla situazione attuale, sia ai due scenari prospettici sul parco veicolare circolante.

Infine la quinta sezione mette in risalto i risultati relativi alla valutazione monetaria dei costi esterni associati agli scenari prefigurati. La valutazione considera sia i costi dell'inquinamento atmosferico legati agli effetti dei vari inquinanti a livello locale e globale, che i costi dell'inquinamento acustico prodotto dai veicoli a motore.

2 L'approccio metodologico

2.1 Descrizione del processo di valutazione dei benefici ambientali

Lo studio è incentrato sulla valutazione dei benefici ambientali dell'e-mobility nell'area metropolitana di Roma e del potenziale contributo alla riduzione delle esternalità negative.

Il focus della valutazione è in particolare quello di fornire una stima dei consumi energetici e delle emissioni complessive, su base annua e sull'intero territorio provinciale, per i principali inquinanti emessi dal parco auto circolante e dalla flotta di autobus impiegata per il servizio TPL. La valutazione include inoltre il computo dei benefici economici che potrebbero derivare dalla riduzione delle esternalità negative.

Le valutazioni sono eseguite rispetto alla situazione attuale, nonché a due scenari prospettici di evoluzione del parco veicolare circolante riferiti al 2025.

Il primo scenario, meno favorevole alla diffusione dell'e-mobility, considera un'evoluzione del parco auto circolante di Roma in linea con i trend del mercato automobilistico. Nel primo scenario si assume in particolare una consistenza pressoché invariata del parco auto fino al 2025 ed un tasso di sostituzione annuo del 5% con nuove auto omologate secondo gli standard di emissione "EURO 6". Nel primo scenario si assume inoltre una maggiore penetrazione al 2025 di auto con alimentazione ibrida (benzina/elettrica) e a metano, rispettivamente 1,8% e 1,2%.

Anche nel secondo scenario si assume per il 2025 una consistenza invariata del parco auto circolante ed un tasso di sostituzione annuo del 5%. Diversamente dal primo scenario, il secondo considera un crescita dell'e-mobility più ottimistica prefigurando per il 2025 un tasso di penetrazione del 10% delle auto elettriche nel parco circolante di Roma.

Per quanto riguarda il servizio TPL del Comune di Roma, nel primo scenario si assume la sostituzione del 30% della flotta di autobus, con nuovi autobus a gasolio con omologazione ambientale "EURO 6". Nel secondo scenario si prefigura invece la sostituzione del 30% della flotta autobus con nuovi autobus elettrici. In entrambi gli scenari evolutivi, gli autobus sostituiti sono quelli più vecchi ed inquinanti con classe di omologazione "EURO 2" ed in parte "EURO 3".

Nella valutazione ambientale dei due scenari evolutivi si assume invariata sia l'entità della mobilità veicolare (veicoli-km) che la produzione annua della flotta di autobus (auto-km).

Le stime dei consumi energetici e delle emissioni sono effettuate prendendo in considerazione l'intera catena dalla fonte energetica alla ruota (well-to-wheel) differenziando le fasi strettamente legate alla fonte primaria da quelli legati alla tecnologia propulsiva. Per i motori a combustione interna sono state considerate tutte le fasi: dall'estrazione della materia prima, alla sua trasformazione in combustibile di trazione, al successivo trasporto alle stazioni di rifornimento e alla fase d'uso da parte del veicolo.

Nel caso dei veicoli elettrici l'efficienza energetica dipende in particolare dal mix energetico di produzione dell'energia elettrica, dal rendimento della rete di trasporto e distribuzione, dai rendimenti delle batterie nelle fasi di carica e scarica e dal rendimento del motore e degli organi di trasmissione.

Un requisito essenziale ai fini della valutazione dei benefici ambientali dell'e-mobility è la stima della mobilità veicolare espressa dalla serie di spostamenti effettuati sull'intera rete viaria della provincia di Roma sia dal parco auto circolante che dalla flotta di autobus per il TPL romano.

La stima richiede, in particolare, la disponibilità di dati sugli spostamenti in termini di origine e destinazione, di lunghezza dei percorsi e di tempi di percorrenza. Inoltre la mobilità veicolare deve essere esaminata per più periodi di riferimento allo scopo di misurare le fluttuazioni su scala giornaliera, settimanale e mensile. Questa conoscenza dettagliata della mobilità veicolare non è facilmente acquisibile se non attraverso stime effettuate sulla base di informazioni relative agli spostamenti effettuati da un campione di veicoli.

Per l'analisi della mobilità veicolare nell'area metropolitana di Roma lo studio si è avvalso di un approccio originale ed innovativo in grado di sfruttare dati provenienti da diverse fonti.

Per la stima della mobilità veicolare privata l'approccio proposto si è basato principalmente sull'utilizzo di raccolte estese di dati geo-referenziati sugli spostamenti effettuati da un campione di veicoli privati (FCD - Floating Car Data).

Gli FCD sono dati provenienti da veicoli sonda, vale a dire i veicoli equipaggiati con apparecchiatura di bordo in grado di acquisire e trasmettere regolarmente specifiche informazioni ad un centro di traffico. I dati comprendono informazioni sui percorsi e sullo stato del veicolo, ad esempio la sua posizione, l'orario, la distanza percorsa dall'ultima registrazione, la velocità istantanea o media, la direzione di marcia e lo stato di moto del veicolo.

Esistono diversi sviluppi della tecnologia FCD che si differenziano per le prestazioni offerte. L'accuratezza delle informazioni ottenute dipende sia dalla frequenza del campionamento e della trasmissione dei dati, dalla precisione del GPS e dal numero di veicoli sonda.

Il vantaggio di utilizzare una consistente collezione di tracce GPS da parte di un campione di veicoli risiede proprio nella possibilità di ricavare una più completa e reale conoscenza dei comportamenti e delle abitudini dei viaggiatori che utilizzano il mezzo privato e di arrivare ad una più specifica caratterizzazione spazio-temporale del traffico cittadino.

Tuttavia l'aspetto più critico della tecnica FCD è senza dubbio quello legato alle dimensioni della flotta di veicoli da cui dipende la significatività dei dati utilizzati. Questo aspetto è stato affrontato nello studio confrontando gli FCD con i conteggi di traffico effettuati dalla rete di rilevatori fissi presenti sulla viabilità romana. La disponibilità di misure dei flussi di traffico veicolare su alcune sezioni della rete ha permesso infatti di stimare la rappresentatività del campione costituito dai veicoli sonda e quindi di estendere i risultati ottenuti, in termini di consumi di carburante e di emissioni di inquinanti, all'intera popolazione entro un determinato intervallo di confidenza.

Gli FCD utilizzati nel presente studio sono quelli gestiti da Octo Telematics, società di servizi che opera principalmente nel settore della telematica applicata ai servizi assicurativi per polizze auto, ai servizi per le case automobilistiche e ai servizi per i trasporti e la viabilità. Le informazioni utilizzate derivano dalle tracce GPS anonime inviate al Centro Servizi di Octo Telematics da una consistente flotta di veicoli privati in movimento equipaggiati con il dispositivo OBU (On Board Unit).

La stima della mobilità veicolare si basa in particolare su due collezioni di tracce GPS.

La prima, riferita all'intera mensilità di Maggio 2013, include tutte le tracce registrate dai veicoli equipaggiati con dispositivo OBU che hanno effettuato spostamenti all'interno di una specifica area comprendente il territorio della provincia di Roma.

La seconda collezione utilizzata nello studio include invece le tracce GPS provenienti da un sotto-campione di veicoli residenti nel comune di Roma. La specificità della seconda collezione risiede nel fatto che le tracce GPS sono riferite alla totalità degli spostamenti effettuati dal campione di veicoli nel corso dell'anno 2013 anche al di fuori del territorio provinciale.

La prima collezione di dati è stata utilizzata per il calcolo dei consumi e delle emissioni di inquinanti di tutti i veicoli, equipaggiati con dispositivo OBU, che hanno effettuato spostamenti all'interno del territorio provinciale nel corso del mese di maggio 2013.

Il risultato del calcolo è stato poi proiettato a tutti i veicoli circolanti sul territorio della provincia di Roma. A tal fine è stata valutata la rappresentatività dei veicoli equipaggiati con OBU rispetto all'intero parco veicolare utilizzando i conteggi di traffico provenienti dalla rete di rilevatori fissi a spira magnetica presenti sulla viabilità di Roma. I conteggi di traffico, effettuati nel mese di Maggio 2013 da 20 apparecchiature di rilevamento, sono stati organizzati ad intervalli di 15 minuti.

Per determinare quantitativamente la significatività statistica dei veicoli sonda sono stati ricostruiti i percorsi dei veicoli sulla rete stradale e poi calcolato il numero di transiti in corrispondenza delle apparecchiature di rilevamento dei flussi di traffico.

Per la ricostruzione dei tragitti percorsi dai veicoli equipaggiati con OBU è stata implementata e applicata una procedura di map-matching che ha permesso di individuare su mappa digitale il segmento stradale

corrispondente a ciascuna traccia GPS e di calcolare il percorso effettuato tra due tracce GPS consecutive. Il risultato finale della procedura di map-matching è dato quindi dalla sequenza ordinata di segmenti e intersezioni stradali attraversati dal veicolo sonda per ogni spostamento effettuato ed i relativi tempi di percorrenza.

L'analisi congiunta dei flussi veicolari ricavati con la tecnologia FCD e delle corrispondenti misure di traffico effettuate con le apparecchiature di rilevamento fisse ha permesso di ottenere il grado di rappresentatività dei veicoli equipaggiati con l'OBU gestita da OCTO Telematics.

E' stata in particolare stimata una incidenza del traffico realizzato dai veicoli sonda sul totale del 6,43%. Considerando un livello di confidenza del 95%, il valore medio è risultato compreso tra il 6,31% e 6,54%.

Per quanto riguarda la mobilità veicolare pubblica su gomma sono stati esaminati i dati della rete e del programma di esercizio del trasporto pubblico locale (TPL) gestito dall'ATAC ed in parte dalla società ROMA TPL che gestisce circa il 20% del servizio di trasporto su bus del territorio romano.

ATAC rappresenta il primo operatore della mobilità urbana in Italia, oltre ad essere una delle più grandi realtà a livello europeo. ATAC ha 11.974 dipendenti e una flotta di circa 2.500 veicoli – fra bus, tram, filobus, vetture elettriche, treni della metropolitana e delle ferrovie. Nel 2014 ha prodotto 154 milioni di chilometri del servizio pubblico di linea, trasportando oltre 1.300 milioni di passeggeri.

Roma TPL conta, invece, su una flotta di circa 440 autobus e coinvolge complessivamente 1900 persone per operare le 83 linee periferiche di competenza. Dispone di 5 depositi in città e si posiziona, per dimensioni, sopra la media delle società di Trasporto Pubblico Locale italiane.

La rete TPL di Roma è disponibile nel formato GTFS (General Transit Feed Specification) nella pagina "Open Data" del sito del Comune di Roma (<http://dati.comune.roma.it/>). Gli open data del TPL romano includono tutte le informazioni sul tracciato delle linee, sulle fermate e sugli orari per tipologia di giornata: feriale, semifestiva e festiva.

Per l'effettuazione delle analisi ambientali è stato applicato il software "ECOTRIP" sviluppato dall'ENEA. ECOTRIP effettua, in particolare, il calcolo dei consumi di carburante, delle emissioni di anidride carbonica (CO₂) e dei principali inquinanti atmosferici prodotti dalla combustione (monossido di carbonio, ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e particolato) dei motori dei veicoli nelle diverse condizioni di funzionamento sia nella fase di riscaldamento del motore (emissioni a freddo) che durante il funzionamento alla temperatura di esercizio (emissioni a caldo).

ECOTRIP considera come dati di ingresso la sequenza dei viaggi effettuati o programmati dai veicoli nel periodo di riferimento. Nel caso dei veicoli sonda, ECOTRIP esegue il calcolo per singola tratta di ogni viaggio compresa tra due tracce GPS consecutive. Nelle analisi ambientali della flotta di veicoli per il TPL, il calcolo viene effettuato per singola tratta tra due fermate di ogni singola corsa lungo ciascuna linea. Le analisi ambientali del TPL sono effettuate su base annua considerando il programma di esercizio dei giorni tipo (feriale, prefestivo e festivo).

Le procedure di stima di ECOTRIP considerano i fattori di emissione e consumo dipendenti dalla velocità media per ogni categoria di veicoli (motocicli, auto, veicoli commerciali leggeri e pesanti, autoarticolati, autobus) e per ogni inquinante.

Le curve dei fattori di emissione e consumo utilizzate in ECOTRIP sono quelle presenti in letteratura (EMEP/EEA "Air pollutant emission inventory guidebook" Agenzia Ambientale Europea [2]), ricavate da misure di emissioni per diverse tipologie, modelli e marche di veicoli e si riferiscono a prove realizzate in vari paesi sia su strada che su banco a rulli.

Le correlazioni EMEP/EEA però non comprendono la trazione elettrica, pertanto, per l'analisi ambientale degli scenari di e-mobility è stata effettuata una campagna sperimentale di misura su strada e a banco per la caratterizzazione dei consumi di un'auto elettrica di fascia media (Nissan Leaf).

La campagna ha permesso di ricavare la correlazione tra consumi elettrici e velocità media. Per quanto riguarda i consumi specifici degli autobus sono state invece utilizzate le curve ricavate tramite simulazioni

effettuate presso la facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila (Sviluppo software simulazione veicoli TPL su cicli reali di utilizzo, Prof. Carlo Villante – DIIE - Università degli Studi dell'Aquila).

Una volta calcolati i consumi e le emissioni su base annua del parco auto circolante e della flotta degli autobus per il TPL è stata effettuata l'analisi dell'intero ciclo dell'energia considerando ogni attività della catena di fornitura (supply chain).

L'applicazione di un approccio, in un'ottica di life cycle analysis, per il calcolo dei consumi di energia primaria e delle emissioni globali ha permesso di valutare la reale entità dei miglioramenti ambientali resi possibili dall'e-mobility.

Il passo finale dell'analisi ambientale ha riguardato la stima dei costi esterni associati all'inquinamento atmosferico e ai cambiamenti climatici prendendo così in considerazione gli effetti delle emissioni da traffico alle diverse scale: da quella locale a quella regionale e globale.

2.2 Lo strumento di calcolo dei consumi e delle emissioni

Un passaggio chiave nell'analisi dei benefici ambientali degli scenari di e-mobility a Roma è stato il calcolo dei consumi energetici e delle emissioni di inquinanti atmosferici generati dal traffico auto privato e dalle flotte di autobus per il TPL. Il calcolo, riferito sia alla situazione attuale che a due differenti scenari prospettici di evoluzione del parco veicolare, è stato eseguito utilizzando il software ECOTRIP sviluppato dall'ENEA.

ECOTRIP è stato ideato e realizzato per la stima dei consumi di carburante e delle emissioni di inquinanti atmosferici prodotti dai veicoli stradali circolanti (ciclomotori moto, automobili, veicoli commerciali leggeri e pesanti, autobus e pullman) a partire da informazioni specifiche sui singoli percorsi realizzati, come la distanza chilometrica e la velocità media.

L'algoritmo utilizza inoltre come dati di input, se disponibili, la temperatura dell'aria esterna, l'età, il chilometraggio annuo, il carico e la pendenza media della tratta che influenza sensibilmente la dinamica di funzionamento del motore.

ECOTRIP, basato sull'EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2016) predisposta dall'Agenzia Europea per l'Ambiente, incorpora specifiche funzioni di stima dei consumi e delle emissioni in relazione alla categoria del veicolo individuata in base al tipo di alimentazione, alla cilindrata (per le autovetture), al peso (per i veicoli commerciali e gli autobus) e allo standard europeo di emissione vigente nell'anno di produzione del veicolo.

ECOTRIP effettua in particolare il calcolo dei consumi di carburante, delle emissioni di anidride carbonica (CO₂) e dei principali inquinanti atmosferici prodotti dalla combustione dei motori dei veicoli (monossido di carbonio, ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e particolato) nelle diverse condizioni di funzionamento sia nella fase di riscaldamento del motore (emissioni a freddo) che durante il funzionamento alla temperatura di esercizio (emissioni a caldo). Le emissioni a freddo occorrono quando il motore è stato spento a lungo; le emissioni di HC e CO sono più elevate poiché il catalizzatore deve raggiungere la temperatura operativa. Inoltre a freddo la benzina non si meschia con l'aria in maniera adeguata. Segue che del carburante incombusto viene emesso in alte concentrazioni.

Per il calcolo delle sovraemissioni a freddo delle auto, l'algoritmo utilizza i metodi riportati nel deliverable 3 del progetto ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems - 2013).

ECOTRIP può considerare come dati di ingresso i percorsi dei veicoli ricostruiti a partire da sequenze di dati geo-referenziati registrati da dispositivi mobili con localizzatore GPS, come smart-phone, tablet e terminali a bordo.

Questa nuova modalità di realizzare la raccolta dati, resa possibile dai recenti progressi del settore dell'ICT, presenta il vantaggio di fornire specifiche informazioni sugli spostamenti effettuati da un campione di persone o veicoli in termini di percorsi, distanze e tempi di percorrenza con una copertura completa dell'intera rete e con continuità nel tempo.

Per l'analisi ambientale degli scenari di e-mobility sull'intera rete viaria della provincia di Roma è stato effettuato l'aggiornamento del software con le nuove funzioni di stima dei consumi e delle emissioni relative a categorie di veicoli di recente ingresso nel parco veicolare circolante in Italia.

Si tratta in particolare di veicoli a trazione elettrica e a propulsione ibrida con tecnologia mista benzina-elettrica senza plug-in. Il lavoro di aggiornamento del software ha incluso, inoltre, l'introduzione delle funzioni relative all'intera gamma di veicoli con standard di emissione EURO 6.

2.2.1 Algoritmo di calcolo per i veicoli a trazione termica

Le funzioni utilizzate per la stima delle emissioni "a caldo" dei principali inquinanti (e del consumo di carburante) sono aggiornate in base alle linee guida dell'EMEP/EEA Air Pollutants Emission Inventory Guidebook rilasciate nel 2016.

Tali funzioni sono state ricavate nell'ambito di numerosi progetti europei di ricerca e sviluppo e rappresentano uno "standard" a livello europeo. Le funzioni, ricavate con il motore in condizioni di funzionamento a caldo, sono date per i seguenti inquinanti atmosferici: Monossido di Carbonio (CO), Idrocarburi incombusti (HC), Ossidi di azoto (NO_x) e Polveri (PM). La guida fornisce inoltre le funzioni per il calcolo dei consumi di carburante (FC), mentre le emissioni della CO₂ sono determinate in base ai consumi e alle quantità di CO, HC e PM emesse. Il metano (CH₄) è ricavato seguendo le percentuali di composizione degli HC per le diverse classi di veicoli e per alimentazione.

La formula generale, implementata dall'applicativo software, che fornisce i Fattori Emissivi (ovvero i fattori di consumo di carburante) è la seguente:

$$FE (g/Km) = [(a + b \cdot V + c \cdot V^2 + d \cdot V^e + f \cdot \ln(V) + g \cdot \exp(h \cdot V)) / (1 + m \cdot V^n)] \cdot (1 - RF)$$

dove V rappresenta la velocità media del "tratto" considerato ed i coefficienti presenti nella formula, che dipendono dalla tipologia veicolare e dall'inquinante, sono riportati in apposite tabelle, reperibili nelle linee guida sopra menzionate.

A titolo di esempio, si riporta una specifica correlazione di emissione per un autoveicolo EURO I a benzina di cilindrata <1400cc per l'inquinante CO:

$$FE (g/Km) = 9.846 - 0.2867 \cdot V + 0.0022 \cdot V^2$$

Per rappresentare l'intero parco di autoveicoli circolanti in Italia nel modello sono state inserite 6 categorie di veicoli: autovetture, veicoli commerciali leggeri, veicoli pesanti, bus, motorini e motociclette. Per ogni categoria, i veicoli sono disaggregati per alimentazione (benzina, gasolio, GPL, gas naturale, energia elettrica) cilindrata o peso, e standard emissivo.

Tutte le autovetture private a benzina precedenti al 1993 (anno di entrata in vigore dello standard EURO 1), sono state classificate come EURO 0, con i fattori di emissione equivalenti alla classificazione ECE-15.04 delle Linee Guida CORINAIR.

Tabella 1. Classificazione dei veicoli di ECOTRIP

Vehicle Type	Fuel Type	Engine capacity/Vehicle weight	Emissions Standard
Passenger_Cars	Diesel	<1.4_l	Euro_0
		1.4-2.0_l	Euro_1
		>2.0_l	Euro_2

			Euro_3 Euro_4 Euro_5 Euro_6 Euro_6C
	Gasoline LPG	<0.8_l 0.8-1.4_l 1.4-2.0_l >2.0_l	Euro_0 Euro_1 Euro_2 Euro_3 Euro_4 Euro_5 Euro_6 Euro_6C
	CNG Hybrid_Gasoline	<0.8_l 0.8-1.4_l 1.4-2.0_l >2.0_l	Euro_4 Euro_5 Euro_6
	Electric	80_kW	Electric
LCV	Diesel Gasoline	< 3.5_t	Euro_0 Euro_1 Euro_2 Euro_3 Euro_4 Euro_5 Euro_6 Euro_6C
	Urban	<=7.5_t <=15_t 15-18_t	Euro_0 Euro_1 Euro_2

BUS		>18_t	Euro_3 Euro_4 Euro_5 Euro_5_SCR Euro_6
	CNG	15-18_t	Euro_1 Euro_2 Euro_3 EEV
	Electric	<=7.5_t <=15_t 15-18_t >18_t	Electric
	Coaches	<=18_t >18_t	Euro_0 Euro_1 Euro_2 Euro_3 Euro_4 Euro_5 Euro_5_SCR Euro_6
HDV	Articulated	14-20_t 20-28_t 28-34_t 34-40_t 40-50_t 50-60_t	Euro_0 Euro_1 Euro_2 Euro_3 Euro_4 Euro_5
	Rigid	<=7.5_t 7.5-12_t 12-14_t	Euro_5_SCR Euro_6 Euro_0

HDV	Rigid	14-20_t	Euro_1
		20-26_t	Euro_2
		26-28_t	Euro_3
		28-32_t	Euro_4
		>32_t	Euro_5
			Euro_5_SCR
			Euro_6
Mopeds	2_stroke	<50_cm^3	Euro_0
	4_stroke		Euro_1
			Euro_2
			Euro_3
Motorcycles	2_stroke 4_stroke	>50_cm^3	Euro_0
		50-250_cm^3	Euro_1
		250-750_cm^3	Euro_2
		>750_cm^3	Euro_3

La metodologia scelta per il calcolo delle extra emissioni a freddo è quella messa a punto da INRETS ed incorporata poi nell'ambito del progetto Europeo ARTEMIS [3]; si basa su di una consistente base di dati ricavati dalle prove sperimentali effettuate presso numerosi laboratori europei, sia nell'ambito del progetto MEET, sia in tempi successivi, sia infine espressamente per il progetto ARTEMIS.

Questa metodologia di calcolo delle emissioni inquinanti, per quando riguarda il calcolo delle "cold EE", prevede tre modelli di calcolo, basati ciascuno sulla disponibilità di specifici dati di input: il primo di questi modelli - che è quello che è stato implementato in ECOTRIP - effettua il calcolo delle "cold EE" di un singolo veicolo e per singolo viaggio, mentre gli altri due modelli si basano su dati di input tratti da statistiche di traffico e non sono quindi contemplati in ECOTRIP.

Inoltre, poiché l'applicativo software è stato impostato in modo da effettuare il calcolo delle "hot emissions" (emissioni di inquinanti in atmosfera a veicolo caldo) e dei consumi di combustibile "tratto" per "tratto" (e quindi con la massima risoluzione consentita dai dati di input) - piuttosto che tragitto per tragitto o viaggio per viaggio - si è ritenuto utile conservare questa impostazione anche per il calcolo delle cold EE.

Le correlazioni ARTEMIS per il calcolo delle cold EE sono definite solo in un intervallo di velocità media (V) compreso tra 18 km/h e 42 km/h e di temperatura ambiente (T) compreso tra -20°C e +30°C. Per valori di V o di T esterni a questi due intervalli, in accordo con quanto suggerisce la metodologia stessa, la procedura di calcolo dell'applicativo software prende i corrispondenti valori al limite.

Le funzioni e correlazioni ARTEMIS per il calcolo della cold EE riguardano le autovetture a benzina e a gasolio, ma vengono dichiarate valide anche per i veicoli commerciali leggeri.

Alla luce di quanto affermato nel report, ed essendo queste extra-emissioni dovute al funzionamento a freddo della marmitta, di cui sono dotati anche i veicoli a gas e ibridi, e i VCL, viene deciso di effettuare il

calcolo anche per questi veicoli: per quelli a gas e gli ibridi sono adottati i coefficienti delle vetture a benzina, e per i VCL quelli delle autovetture di stessa alimentazione e cilindrata >2000cc.

Le correlazioni per il calcolo delle emissioni "cold", inoltre, sono fornite per gli inquinanti CO, CO₂, HC e NOx e PM, per cui gli extra consumi per partenza "a freddo" vengono calcolati mediante computo stechiometrico a partire dalle extra emissioni di CO₂, CO, HC e PM.

2.2.2 Altri fattori correttivi considerati

a) **Correzione per la pendenza:** La differenza di quota tra il punto iniziale e finale del percorso di un'autovettura ha una notevole influenza sia sui consumi che sulle emissioni inquinanti.

CORINAIR dà funzioni specifiche di FE solo per i veicoli pesanti e i bus per i valori di gradiente della strada pari a -6%, -4%, -2%, 2%, 4% e 6%, mentre per le altre categorie di veicoli non viene preso in considerazione questo fattore.

b) **Correzione per il chilometraggio:** la procedura di calcolo implementata dall'applicativo include anche una correzione, delle emissioni "a caldo", dovuta all'anzianità delle autovetture a benzina con marmitta catalitica (quindi dagli EURO 1 in poi), espressa come chilometraggio complessivo percorso dall'autovettura al momento dell'uso. Tale correzione viene effettuata utilizzando delle apposite funzioni di correzione, ricavate anch'esse dalle Linee Guida CORINAIR, che correlano il chilometraggio del veicolo al suo decadimento di efficienza.

Nel caso in cui il dato delle percorrenze non sia disponibile, ECOTRIP è in grado di stimarlo, attraverso un algoritmo originale, dall'anzianità del veicolo, ricavata dall'anno di immatricolazione o dallo standard emissivo.

In ECOTRIP questi fattori di correzione sono stati applicati anche alle autovetture ibride e alimentate a gas, perché anch'esse affette dallo stesso degradamento della marmitta.

2.2.3 La curva dei consumi specifici in funzione della velocità media per l'auto elettrica

E' stata svolta l'analisi dei dati sperimentali della campagna effettuata recentemente dall'ENEA per qualificare le prestazioni energetiche delle auto elettriche.

La campagna ha riguardato in particolare il modello Nissan Leaf equipaggiato con apparecchiatura dedicata a bordo per l'acquisizione e registrazione dei pacchetti dati che transitano nella rete CAN realizzata per la comunicazione tra i molti dispositivi elettronici presenti all'interno delle automobili.

I dati, acquisiti con una frequenza di 10Hz, sono quelli relativi allo stato del motore, alle condizioni di marcia e al funzionamento della batteria per un periodo di un anno con percorrenze su strade di vario tipo: urbane, extraurbane e autostrade. Le misure su strada sono state integrate con misure su banco a rulli utilizzando cicli standard di marcia.

La Nissan Leaf appartiene alla categoria delle BEV (Battery Electric Vehicle) ed è dotata di propulsore 100% elettrico alimentato da una batteria. Essendo uno dei veicoli più recenti di questa tipologia, rappresenta lo stato attuale delle tecnologie adottate.



Figura 1. La Nissan Leaf utilizzata nella campagna di misure

La filosofia costruttiva della vettura è naturalmente incentrata sul risparmio dei consumi: a partire dal design che le conferisce un ridotto coefficiente aerodinamico (C_x) fino all'adozione di strumentazione ad alta efficienza (illuminazione a led ad esempio).

Di seguito sono riportati (Tabella 2) i dati dichiarati dal costruttore di maggiore interesse per le successive analisi.

Tabella 2. Caratteristiche del modello Nissan Leaf

Motore	Elettrico, sincrono a corrente alternata
Coppia[Nm]	280 da 0 a 2730 rpm
Potenza[kW]	80
Velocità massima[km/h]	145
Autonomia (ciclo europeo NEDC) [Km]	175
Trasmissione	Singolo rapporto, avanti + retromarcia
C_x	0.29
Massa a vuoto[Kg]	1500
Superficie Frontale[m²]	1.77x1.55
Batteria	Laminata, agli ioni di litio
Capacità[kWh]	24

La Nissan Leaf è dotata di un sistema di ricarica mediante connettore contenuto nella parte frontale del veicolo, secondo le diverse modalità:

- La linea elettrica domestica (220V, alimentata a 10A garantisce tempi di ricarica di 12ore)
- Home box: stazione di ricarica a parete installata sulla linea domestica (220V, 16A, ricarica completa in 8 ore)
- Colonnine di ricarica (400V, 125A, carica all' 80% della capacità totale, in 30minuti)

Per l'acquisizione dei dati è stata installata a bordo del veicolo una speciale apparecchiatura interfacciata alla rete CAN. L'acquisizione dei dati è stata impostata con una frequenza di 10 Hz, mentre l'archiviazione degli stessi in file con formato CSV avviene ad intervalli regolari dopo un predefinito numero di acquisizioni.

I dati più significativi misurati a bordo sono:

- **Date:** riporta la data e l'orario, quindi l'istante, a cui la stringa di dati fa riferimento
- **MotorT_Nm:** esprime la coppia richiesta dal guidatore
- **Motor_Rpm:** numero di giri al minuto motore
- **Battery_A:** corrente uscente (positiva) o entrante (negativa) nelle batterie misurata in A
- **Battery_V:** tensione delle batterie; in condizioni regolari è costante a 370-380V
- **Vleft, Vright, Vveichle:** rispettivamente velocità [km/h] delle ruote sinistra, destra e effettiva del veicolo
- **SOC:** stato delle ricarica
- **Kwh:** energia disponibile in kWh immagazzinata nel pacco batterie
- **Battery_Kw:** potenza in uscita (positiva) o ingresso (negativa) alla batteria, rispettivamente nelle fasi di trazione e ricarica
- **Motor_Kw:** potenza erogata dal motore positiva se è in trazione, viceversa se il veicolo è in recupero
- **Acpower, heaterpower:** potenza [Kw] assorbita dal sistema di climatizzazione dell'abitacolo

Per le prove su strada sono stati percorsi circa 3600 chilometri su viabilità sia urbana che extraurbana mentre per le prove su banco a rulli sono stati riprodotti cicli di guida di omologazione.

L'analisi dei dati sperimentali ha permesso di estrarre la funzione (Figura 2) che associa il consumo specifico chilometrico alla velocità media per il modello Nissan Leaf appartenente al segmento auto di medie dimensioni. La funzione ottenuta ha la seguente espressione:

$$FC(Kwh/Km) = 2 \cdot 10^{-05} \cdot V^2 - 18 \cdot 10^{-04} \cdot V + 0.1759 \quad (1)$$

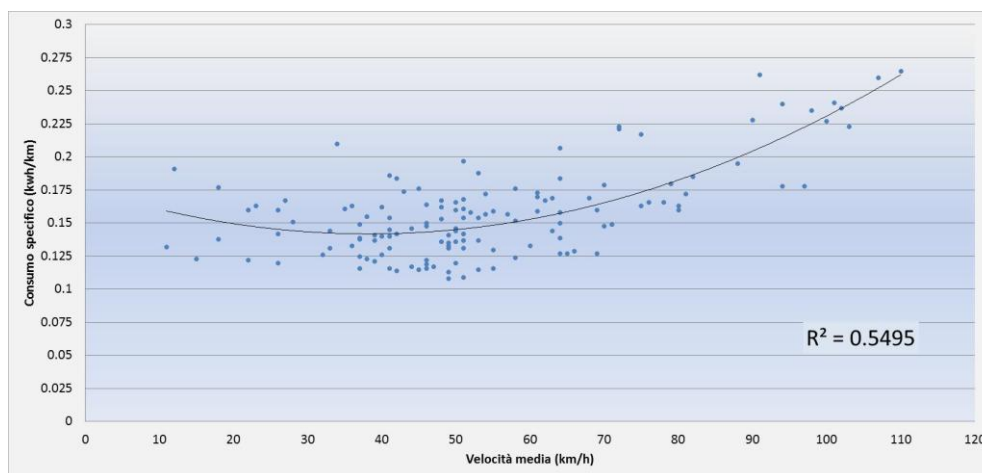


Figura 2. Curva sperimentale del consumo specifico chilometrico in base alla velocità media

2.2.4 Algoritmo per il calcolo del consumo dei bus elettrici

Per le analisi ambientali relative al TPL sono state utilizzate le funzioni ottenute dall'Università degli dell'Aquila tramite simulazione di autobus elettrici su cicli reali di marcia.

La simulazione è stata svolta presso i laboratori della facoltà di Ingegneria dell'Aquila su circa 3000 diverse configurazioni (corrispondenti a più di due anni di tempo di circolazione simulato), corrispondenti a tutte le combinazioni possibili di pendenza (7 valori: -6% -4%, -2%, 0%, 2%, 4%, 6%), carico (0%, 50%, 100%), configurazione (Mini, Midi, Standard, Articolato) e Sistema di trazione (BEV o Convenzionale),

Per le simulazioni è stata considerata una serie di 23 missioni reali a diversa velocità media di percorrenza. I cicli reali di marcia sono stati misurati con apparecchiatura, realizzata dall'ENEA, montata a bordo di alcuni autobus in servizio presso le città di Ravenna, Bologna e Torino.

La simulazione sui mezzi convenzionali è stata eseguita per convalidare la metodologia, soprattutto dei cicli di guida, visto che quelli utilizzati nel progetto ARTEMIS (che ha prodotto le curve CORINAIR) non erano disponibili. I risultati mostrano un buon accordo tra i dati CORINAIR e quelli calcolati tramite simulazione.

In ognuna delle configurazioni si sono calcolate le curve esponenziali interpolanti al variare della velocità media di percorrenza, così come suggerito dalla procedura CORINAIR, per i veicoli elettrici e i relativi coefficienti sono riportati in Tabella 3.

$$FC \text{ (kWh/km)} = \alpha \cdot \text{Speed}^\beta$$

Tabella 3. Coefficienti della funzione relativa ai consumi energetici degli autobus

BUS	Load 0%			Load 50%			Load 100%		
	Slope	α	β	Slope	α	β	Slope	α	β
MINI	-0,06	2,5411	-1,341	-0,06	5,6754	-1,623	-0,06	9,2113	-1,788
	-0,04	2,5411	-1,341	-0,04	5,6754	-1,623	-0,04	9,2113	-1,788
	-0,02	0,1575	0,1335	-0,02	0,2056	0,0901	-0,02	0,2488	0,668
	0	0,3959	0,2623	0	0,3363	0,2216	0	0,4369	0,1837
	0,02	0,507	0,1979	0,02	0,6925	0,1575	0,02	0,9222	0,3455
	0,04	0,8741	0,1383	0,04	1,2313	0,087	0,04	1,7118	0,0241
	0,06	0,8741	0,1383	0,06	1,2313	0,087	0,06	1,7118	0,0241
MIDI	-0,06	6,8107	-1,59	-0,06	11,387	-1,762	-0,06	17,026	-1,896
	-0,04	6,8107	-1,59	-0,04	11,387	-1,762	-0,04	17,026	-1,896
	-0,02	1,0291	-0,493	-0,02	1,3242	-0,545	-0,02	1,5555	-0,569
	0	0,5009	0,01015	0	0,596	0,0935	0	0,694	0,086
	0,02	0,8485	0,1232	0,02	1,0415	0,1085	0,02	1,2559	0,0912
	0,04	1,3801	0,0943	0,04	1,7228	0,0742	0,04	2,1347	0,0466
	0,06	1,3801	0,0943	0,06	1,7228	0,0742	0,06	2,1347	0,0466
STANDARD	-0,06	17,176	-1,93	-0,06	28,790	-2,314	-0,06	41,023	-2,414
	-0,04	17,176	-1,93	-0,04	28,790	-2,314	-0,04	41,023	-2,414
	-0,02	4,1733	-1,001	-0,02	5,9565	-1,877	-0,02	7,1187	-1,941
	0	0,7237	0,033	0	0,8793	-0,014	0	1,0533	-0,022
	0,02	1,1791	0,0879	0,02	1,5419	0,0347	0,02	1,9926	-0,006
	0,04	1,9146	0,06559	0,04	2,6068	-0,006	0,04	3,5283	-0,072
	0,06	1,9146	0,06559	0,06	2,6068	-0,006	0,06	3,5283	-0,072
ARTI	-0,06	31,346	-2,173	-0,06	47,386	-2,314	-0,06	63,019	-2,414
	-0,04	31,346	-2,173	-0,04	47,386	-2,314	-0,04	63,019	-2,414

	-0,02	26,582	-1,729	-0,02	43,077	-1,877	-0,02	54,711	-1,941
	0	0,9473	-0,024	0	1,1356	-0,014	0	1,3744	-0,022
	0,02	1,5083	0,0613	0,02	2,0333	0,0347	0,02	2,7097	-0,006
	0,04	2,4731	0,042	0,04	3,523	-0,006	0,04	4,9804	-0,072
	0,06	2,4731	0,042	0,06	3,523	-0,006	0,06	4,9804	-0,072

2.2.5 Il risultato del calcolo

Il software effettua il calcolo, sia a caldo (hot emissions) che a freddo (cold extra emissions), dei consumi di combustibile, delle emissioni di CO2 (ad ossidazione totale) e delle emissioni dei seguenti inquinanti atmosferici: NOx, HC, CO, CO2 e polveri

Vengono forniti i seguenti dati di output per ogni veicolo analizzato lungo tutto il suo tragitto.

- Dati di emissione: quantità rilasciate in atmosfera - espresse in g;
- Dati di consumo di combustibile: consumo espresso in grammi.

Per ogni tratto, i dati in questione sono:

- consumo di carburante (grammi) ,
- dati di emissione di CO2 (grammi) (ad ossidazione totale),
- dati di emissione (grammi) per i cinque inquinanti atmosferici sopra menzionati.

Gli otto dati suddetti sono forniti sia a caldo che a freddo per ciascun "tratto".

Ecotrip memorizza i dati in un DB ed include le procedure eventuali aggregazioni richieste dagli utenti - sia in termini di veicolo (tragitto, giornata, ecc.), sia in termini territoriali (ad esempio per zona di traffico) che di tempo (ad esempio per fascia oraria) - in funzione delle loro specifiche esigenze.

La procedura di integrazione e di interfaccia tra l'applicativo e l'unità centrale - costituita dalla menzionata classe JAVA - è in grado di mantenere la corrispondenza tra i valori calcolati delle emissioni inquinanti e l'orario e la posizione di emissione. I valori delle emissioni saranno convenzionalmente riferiti alla posizione ed orario della "traccia" di arrivo di ciascun tratto.

3 Il caso di studio

La provincia di Roma, dal 31 dicembre 2014 denominata “La città metropolitana di Roma Capitale”, si estende su una superficie di circa 5.363 km², corrispondente a circa un terzo del territorio del Lazio. La Provincia di Roma è formata da 121 Comuni in cui vivono oltre 4.340.474 di abitanti cui corrisponde una densità di circa 809 abitanti/km².

Nel comune di Roma risiedono 2.864.731 abitanti, mentre i comuni con più di 50mila abitanti sono solamente 7 (su 120), nell’ordine Guidonia, Fiumicino, Pomezia, Tivoli, Velletri, Civitavecchia e Anzio, e da soli totalizzano il 30% della popolazione della cintura provinciale (escludendo Roma). In ogni caso il comune più grande, Guidonia, non supera gli 85mila abitanti, ossia una taglia dimensionale paragonabile ad uno dei quartieri (nemmeno fra i più popolosi) di Roma.

Altro fenomeno correlato alla mobilità romana è la dimensione del parco auto, che nell'anno 2015 è sceso a 2.665.174 milioni di auto, con una contrazione di poco superiore al 5% rispetto al 2010, riconducibile in gran parte al perdurare della crisi economica (particolarmente evidente nel 2012) che ha spinto molti proprietari a rinunciare alla propria auto. Sempre nel 2015 nella provincia di Roma risultavano registrati 521.070 motocicli, 229.070 veicoli industriali leggeri (fino a 3,5 tonnellate), 39.010 veicoli industriali pesanti e 8.589 autobus/pullman. Anche nel comune di Roma tra il 2010 e il 2015 il parco auto ha subito una consistente riduzione da 1.906.035 a 1.754.910 auto.

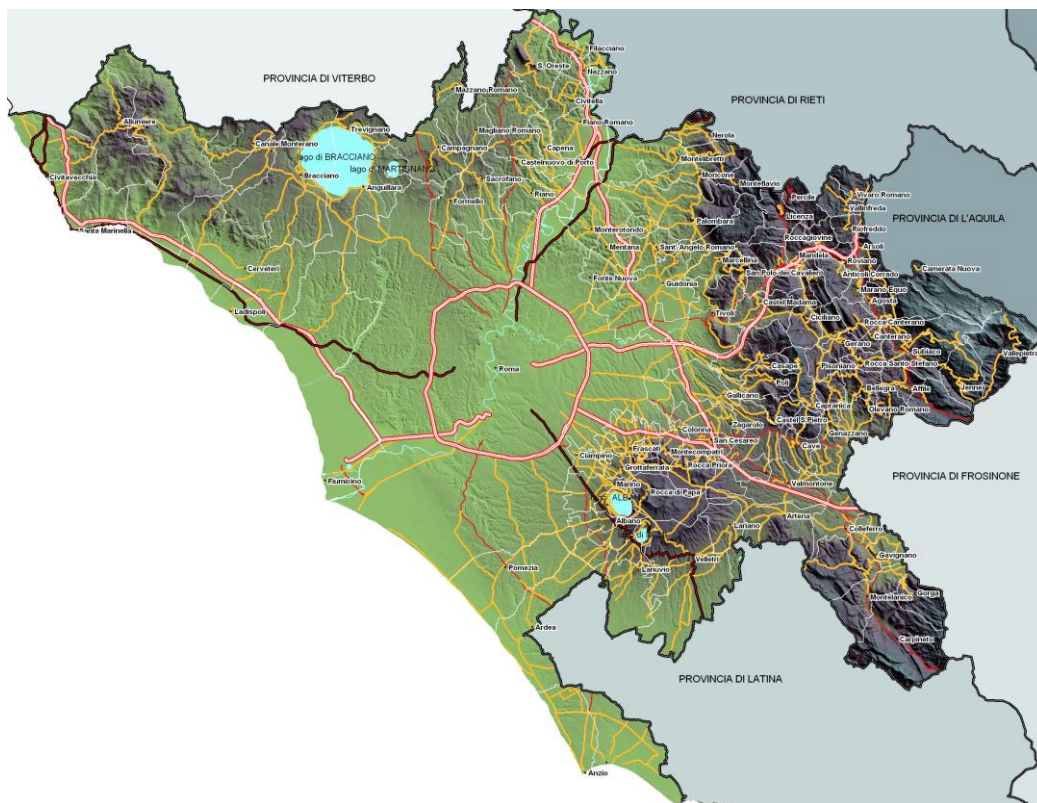


Figura 3. Il territorio della provincia di Roma

Nel 2015 il tasso di motorizzazione nella provincia Roma è sceso a 614 auto ogni 1000 abitanti. In Tabella 4 è riportato il parco auto circolante a Roma nel 2015 suddiviso per alimentazione, fascia di cilindrata ed omologazione ambientale.

L’area delimitata dal GRA è pari a circa 345 kmq e su di essa insiste una popolazione di 2,15 milioni di persone. La densità territoriale è di circa 6150 ab/kmq, mentre se, invece, si considera la sola superficie urbana (140 kmq dentro il raccordo, pari al 40% dell’area intra GRA) la densità sale a poco più di 15mila ab/kmq su valori cioè comparabili con quelli delle aree metropolitane più densamente abitate.

Tabella 4. Parco auto circolante a Roma in base alla classificazione COPERT (2015)

PROVINCIA	ALIMENTAZIONE	FASCIA	EURO 0	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6	Non contemplato	Non definito	TOTALE	
ROMA	BENZINA	Fino a 1400	161'412	41'467	185'008	172'108	374'267	198'771	30'188		1'387	1'164'608	
		1401 - 2000	48'360	22'316	52'192	29'860	47'980	14'457	1'950		225	217'340	
		Oltre 2000	9'337	2'810	4'832	4'008	7'907	1'866	253		38	31'051	
		Non definito	103		2	1			2			4	112
		BENZINA Totale		219'212	66'593	242'034	205'977	430'154	215'096	32'391		1'654	1'413'111
	BENZINA E GAS LIQUIDO	Fino a 1400	7'580	1'290	4'975	3'989	59'028	33'957	7'586			5	118'410
		1401 - 2000	8'629	3'020	6'246	3'295	9'469	5'696	88			3	36'446
		Oltre 2000	799	300	625	440	898	37				1	3'100
		Non definito	2					1	2				5
		BENZINA E GAS LIQUIDO Totale		17'010	4'610	11'846	7'724	69'396	39'692	7'674		9	157'961
	BENZINA E METANO	Fino a 1400	286	61	281	211	6'906	6'148	1'020				14'913
		1401 - 2000	273	135	379	445	2'000	196	38			3	3'469
		Oltre 2000	24	14	30	16	105	7					196
		BENZINA E METANO Totale		583	210	690	672	9'011	6'351	1'058		3	18'578
	ELETTRICO IBRIDO	Fino a 1400						45	471	28			544
		1401 - 2000		1				457	7'319	1'025			8'802
		Oltre 2000						207	469	84			760
		Non contemplato									730		730
		ELETTRICO IBRIDO Totale		1				709	8'259	1'137	730		10'836
	GASOLIO	Fino a 1400	5'201	266	740	38'592	132'181	66'326	1'296			3	244'605
		1401 - 2000	20'255	5'765	43'356	155'096	220'152	212'586	15'154			18	672'382
		Oltre 2000	15'151	4'405	15'775	38'654	40'694	28'816	3'710			14	147'219
		Non definito	1						2				5
	GASOLIO Totale		40'608	10'436	59'871	232'344	393'027	307'730	20'160		35	1'064'211	
ALTRE	Fino a 1400	17										17	
	1401 - 2000	1		1			2					4	
	ALTRE Totale		18	1			2					21	
NON DEFINITO	Fino a 1400	289	3	3	1						13	309	
	1401 - 2000	50	4			3	1				5	63	
	Oltre 2000	3		1	2	1						7	
	Non definito	49	1		1			7			19	77	
	NON DEFINITO Totale		391	8	4	7	2	7			37	456	
ROMA Totale			277'823	81'857	314'446	446'724	902'301	577'135	62'420	730	1'738	2'665'174	

Fonte: ACI

Da recenti indagini svolte dall'Agenzia della Mobilità di Roma risulta che nell'ora di punta del mattino la popolazione presente nell'area metropolitana (Comune di Roma più la sua provincia) genera complessivamente 743 mila spostamenti dei quali, più del 50%, per la precisione 396mila, con origine e destinazione all'interno del GRA. Inoltre nel computo della mobilità dell'ora di punta occorre anche considerare lo scambio tra l'area intra GRA e la quinta (restante area comunale) /sesta (Acilia e Ostia) zona PGTU quantificabile in circa 140mila spostamenti totali e lo scambio tra la zona Intra GRA e la provincia quantificabile in circa 106mila spostamenti.

Considerando i soli spostamenti che hanno almeno un terminale situato all'interno del territorio comunale di Roma (con origine dall'area metropolitana di Roma e Provincia), la mobilità complessiva nell'ora di punta raggiunge i 681mila spostamenti. Con riferimento alla ripartizione modale dell'area comunale si ha che, per quel che riguarda la composizione degli spostamenti in generazione per modalità di spostamento, è prevalente l'impiego del mezzo privato che raggiunge il 65%. Il mezzo pubblico raggiunge il 29%, i piedi il 6%.

Per quel che riguarda il trasporto pubblico i tempi medi di spostamento sfiorano i 50' e la distanza media supera di poco gli 11 km. Per il trasporto privato la distanza è leggermente superiore, quasi 13 km, ma è inferiore il tempo di percorrenza che si attesta sui 44' circa. Le velocità commerciali sono grosso modo equivalenti. Ad oggi 14 km/h sul pubblico e poco più di 17 km/h sul privato.

3.1 Il sistema FCD

Gli FCD utilizzati nel presente studio sono quelli gestiti da Octo Telematics, società di servizi che opera principalmente nel settore della telematica applicata ai servizi assicurativi per polizze auto, ai servizi per le case automobilistiche e ai servizi per i trasporti e la viabilità. Le informazioni utilizzate derivano dalle tracce GPS anonime inviate al Centro Servizi di Octo Telematics da una consistente flotta di veicoli privati in movimento equipaggiati con il dispositivo OBU (On Board Unit).

La OBU ha al proprio interno tre elementi fondamentali: un localizzatore satellitare GPS, un accelerometro per la rilevazione dei crash e un modulo GSM-GPRS per la comunicazione automatica e/o su richiesta dei dati memorizzati e delle posizioni al Centro Servizi.

Il ricevitore GPS identifica la posizione del veicolo nel sistema di riferimento geografico WGS84. Il ricevitore GPS associa alla posizione la data e l'ora al meridiano di Greenwich, la velocità istantanea e la direzione di marcia del veicolo espressa in gradi rispetto al Nord geografico, nonché la qualità del segnale GPS espressa da un indice variabile da 1 a 3. L'indice di qualità del segnale è pari a 1 se il numero di satelliti visibili è inferiore a due.

Tale condizione potrebbe comportare una sequenza di informazioni non completamente attendibili o caratterizzate da errori di posizionamento. Se invece l'indice è pari a 2 i satelliti visibili sono inferiori a 3, mentre l'indice è pari a tre indica un'ottima ricezione del segnale caratterizzata dalla visibilità di 3 o più satelliti. L'incertezza nella misura della posizione è fortemente influenzata sia dalla qualità del segnale GPS. Quando il segnale è buono l'incertezza è solitamente intorno ai 10 metri, mentre in situazioni sfavorevoli di copertura satellitare l'errore della posizione può aumentare fino a 30 metri e più.

La OBU svolge funzioni di registrazione dell'utilizzo del veicolo. In particolare la OBU registra sequenze di posizioni durante lo spostamento del veicolo, oltre ad accensioni e spegnimenti, memorizzando così le caratteristiche dei percorsi. La frequenza di registrazione delle posizioni dei veicoli è attualmente programmata in due modalità: ogni 35 secondi quando il veicolo è localizzato lungo la rete autostradale italiana o lungo alcune principali arterie stradali situate in aree metropolitane, ogni 2 chilometri di percorrenza nei restanti casi. L'invio delle sequenze di posizioni al Centro Servizi da parte del modulo GSM-GPRS è attualmente programmato ogni 40 registrazioni di posizione.

In sintesi il dispositivo di bordo fornisce le seguenti informazioni utili per le analisi delle caratteristiche di mobilità:

- Un codice univoco fino a sei cifre identificativo del veicolo (Id_terminale);
- La data e l'orario di acquisizione dell'informazione riferita al meridiano di Greenwich;
- Le coordinate spaziali del punto, in termini di latitudine e longitudine espresse in milionesimi di grado nel sistema WGS84;
- La velocità istantanea del veicolo espressa in km/h;
- La direzione di marcia del veicolo espressa in gradi (0°: Nord; 90°: Est);
- La qualità del segnale GPS, espressa da un indice variabile tra 1 e 3;
- Lo stato di moto del veicolo (0: accensione; 1: moto; 2: spegnimento);
- La distanza in metri percorsa dal punto GPS immediatamente precedente.

La stima della mobilità veicolare si basa in particolare su due collezioni di tracce GPS. La prima, riferita all'intera mensilità di Maggio 2013, include tutte le tracce registrate dai veicoli equipaggiati con dispositivo OBU che hanno effettuato spostamenti all'interno di una specifica area comprendente il territorio della provincia di Roma. La seconda collezione utilizzata nello studio include invece le tracce GPS provenienti da un campione di veicoli residenti nel comune di Roma. La specificità della seconda collezione risiede nel fatto che le tracce GPS sono riferite alla totalità degli spostamenti effettuati dal campione di veicoli nel corso dell'anno 2013 e non solo quelli compiuti all'interno di un territorio limitato.

La collezione relativa al mese di Maggio 2013 include poco più di 157 milioni di tracce registrate da circa 150 mila veicoli. Il dataset è stato preliminarmente elaborato per l'individuazione degli errori e la loro correzione. In particolare gli errori connessi alla misurazione e alla registrazione a bordo, oppure derivante dal troncamento delle informazioni nell'interrogazione a causa della delimitazione dell'area di studio, sono stati quantificati e classificati per categorie.

Dall’elaborazione di questi dati grezzi sono stati estratti i viaggi effettuati da ciascun veicolo sull’area di studio attraverso l’individuazione della sequenza di tracce comprese tra l’accensione e lo spegnimento del motore del veicolo.

La procedura di aggregazione dei dati grezzi per viaggio ha portato all’identificazione di circa 14 milioni di traiettorie che hanno permesso di capire i pattern che caratterizzano gli spostamenti effettuati dalle persone che utilizzano il mezzo privato durante la loro attività quotidiana.

Le percorrenze complessive realizzate dai veicoli nell’area di estrazione dei dati risulta pari a 117 milioni di chilometri, mentre quelli effettuati all’interno del territorio provinciale risultano pari a circa 97 milioni di chilometri.

L’estrazione dei viaggi ha permesso di ottenere alcuni indicatori di mobilità veicolare riguardanti l’intera area di studio come la frequenza di utilizzo dell’autovettura, le distanze percorse, i tempi di percorrenza e le velocità medie per fasce orarie e giorno della settimana. In Figura 4. Alcuni esempi di elaborazione degli FCD sono illustrati alcuni risultati dell’analisi dei dati FCD.

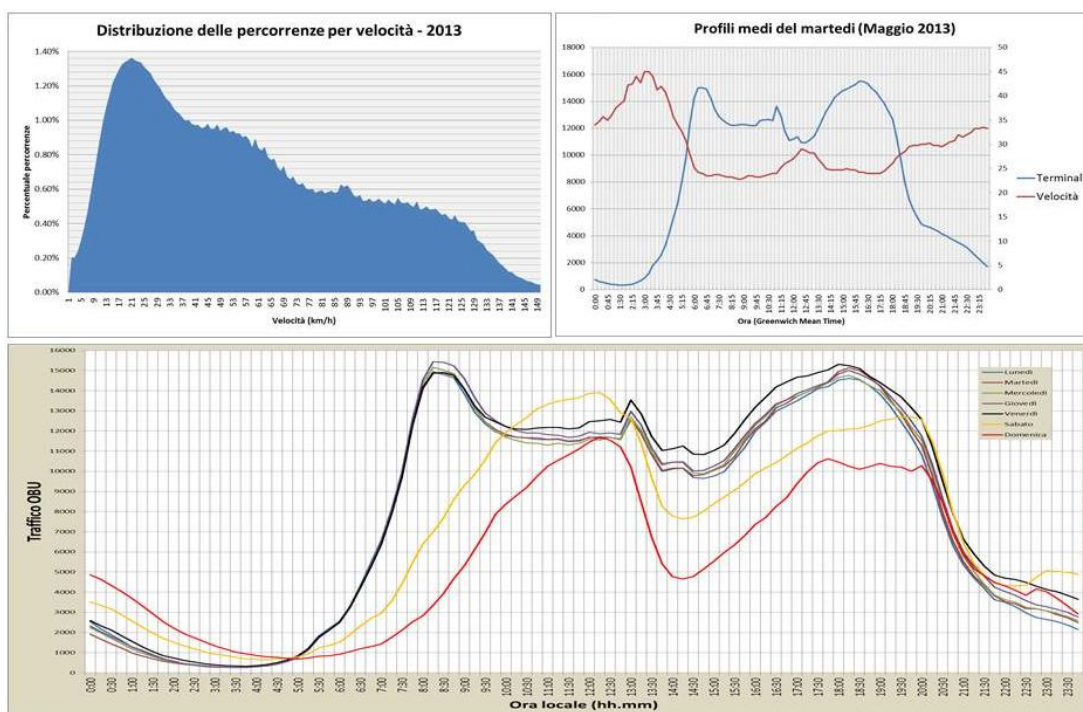


Figura 4. Alcuni esempi di elaborazione degli FCD

La seconda collezione di tracce GPS proviene da un campione di 30.396 veicoli registrati nel comune di Roma. La specificità della seconda collezione risiede nel fatto che le tracce GPS sono riferite alla totalità degli spostamenti effettuati dal campione di veicoli nel corso dell’anno 2013 inclusi quelli effettuati al di fuori del territorio provinciale. Per una descrizione più approfondita del campione e delle statistiche sulla mobilità si rimanda al Report Rds/PAR2014/105 (A. Genovese, G. Giuli, M. Mancini, Elettromobilità urbana e Sistemi di Ricarica Multisorgente).

Dall’analisi dei viaggi realizzati nel 2013 dai 30.395 veicoli registrati a Roma è risultata una percorrenza media di circa 11.600 km; poco più dell’80% delle percorrenze è stato realizzato sul territorio della provincia di Roma. Le percorrenze medie giornaliere, riportate in Figura 5, variano tra i 30,3 chilometri di Giugno ai 25,6 km di Agosto. Le analisi mostrano inoltre che le percorrenze realizzate dal campione di veicoli nel mese di Maggio corrispondono all’8,8% delle percorrenze realizzate dagli stessi veicoli nel corso del intero anno 2013.

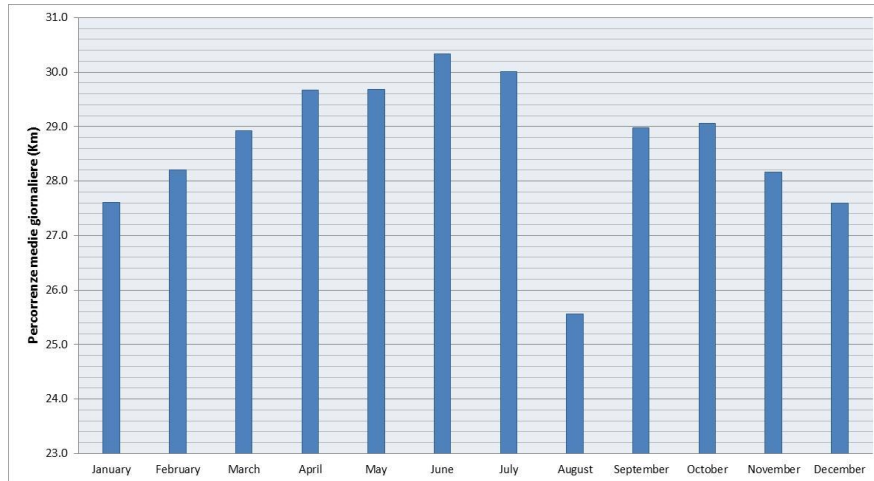


Figura 5. Percorrenze medie giornaliere (2013)

La collezione di dati FCD relativa all'intero anno 2013 è stata inoltre utilizzata per valutare la compatibilità delle percorrenze realizzate da ciascun veicolo con l'attuale livello di autonomia delle batterie. L'analisi è stata effettuata considerando l'intera sequenza di viaggi e soste effettuati da ciascun veicolo del campione nel corso dell'anno 2013.

Per il calcolo dei consumi energetici è stata applicata la funzione:

$$FC(\text{Kwh/Km}) = 2 \cdot 10^{-05} \cdot V^2 - 18 \cdot 10^{-04} \cdot V + 0.1759 \quad (1)$$

ricavata sperimentalmente con le prove su strada e su banco a rulli effettuate dall'ENEA con il modello Nissan Leaf.

Il calcolo è stato effettuato utilizzando le informazioni su distanza percorsa e velocità media associate a ciascuna tratta compresa tra due tracce GPS consecutive di ciascun viaggio. Per la ricarica delle batterie è stata considerata una sosta con durata minima di 30 minuti. In particolare per le soste con durata massima di 2 ore è stata ipotizzata la modalità di ricarica rapida da 50 kW, mentre per le soste con durata superiore alle 2 ore è stata supposta la modalità di ricarica lenta da 8 kW.

Dalle simulazioni è risultato che le percorrenze del 24% dei 29.218 veicoli che hanno percorso più di 1000 km nel corso dell'anno sono pienamente compatibili con i limiti di autonomia delle batterie attualmente in uso. Le percorrenze annue realizzate dal 24% dei veicoli corrispondono al 16% di quelle realizzate complessivamente dai 29.218 veicoli del campione.

In Figura 6 è riportata la frequenza cumulata dei veicoli in base alla percentuale di percorrenze incompatibili. La figura evidenzia che circa il 45% dei veicoli del campione ha una percentuale di percorrenze incompatibile inferiore al 5%; la percentuale sale a circa il 59% per percentuali di percorrenze inferiori al 10%.

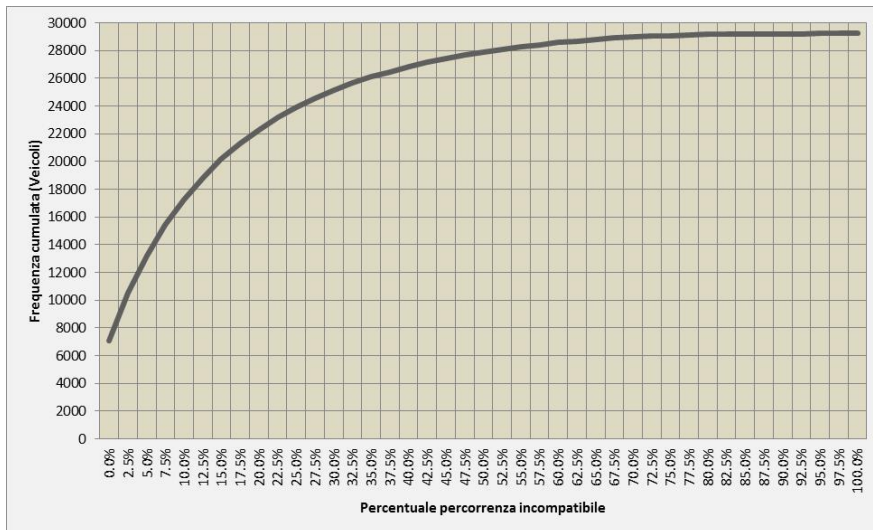


Figura 6. Frequenza cumulata dei veicoli in base alla percentuale di percorrenza incompatibile con autonomia del veicolo

3.2 La rete di sensori fissi

Per proiettare i risultati del calcolo dei consumi e delle emissioni dei veicoli equipaggiati con OBU a tutti i veicoli circolanti sul territorio della provincia di Roma è stata valutata la rappresentatività dei veicoli sonda rispetto all'intero parco veicolare utilizzando i conteggi di traffico provenienti dalla rete di rilevatori fissi a spira magnetica presenti sulla viabilità di Roma.

I conteggi di traffico, misurati da 20 apparecchiature di rilevamento costituite da spire magnetiche, sono organizzati ad intervalli di 15 minuti e coprono l'intero mese di maggio 2013. In Figura 7 sono riportate le posizioni su mappa dei sensori fissi.

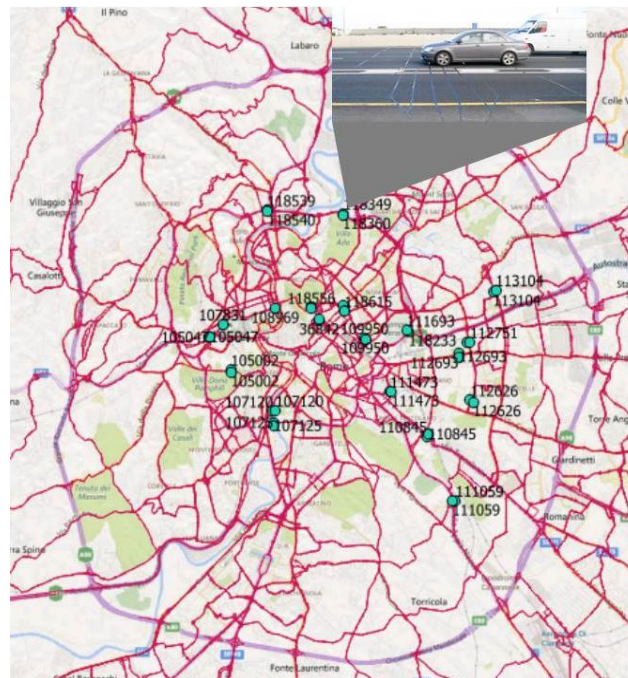


Figura 7. Dislocazione delle spire di traffico

Per la stima del numero dei veicoli sonda in transito su ciascuna spira di traffico è stato sviluppato e applicato un algoritmo di map-matching che ha permesso di ricostruire i percorsi dei veicoli sonda sulla rete

stradale digitalizzata (MULTINET). L'algoritmo fornisce in output per ciascun viaggio la sequenza di archi e di nodi attraversati con i relativi tempi di percorrenza in base alla struttura topologica e geometrica della rete stradale e al vincolo spaziale determinato dalla distanza tra due tracce consecutive misurata dal dispositivo di bordo.

L'algoritmo utilizza la rete digitale MULTINET della provincia di Roma rappresentata da un grafo costituito da 205.567 nodi e 249.844 archi per un totale di circa 24.950 chilometri di lunghezza complessiva. Il grafo include 182.561 archi con doppio senso di marcia e 42667 manovre vietate.

La ricostruzione dei tragitti percorsi sulla rete ha permesso la stima dei flussi dei veicoli sonda per ciascun sensore per l'intero mese di Maggio 2013. I flussi stimati sono stati aggregati sulla base della fascia oraria di punta del mattino (07:00-09:00) dei giorni feriali e, successivamente, confrontati con i corrispondenti flussi misurati dai sensori fissi per ottenere l'incidenza percentuale del flusso di veicoli sonda sul totale misurato.

Sono stati così ottenuti 22 valori di incidenza percentuale per ciascuna delle 20 spire prese in considerazione. È stato, infine, calcolato il valore medio dell'incidenza percentuale (6,43%) e l'intervallo di variabilità del valore medio, tra il 6,31% e 6,54%, corrispondente ad un livello di confidenza del 95%.

3.3 La rete e il servizio TPL

Per quanto riguarda la mobilità veicolare pubblica è stata utilizzata la rete del trasporto pubblico locale (TPL) gestita dall'ATAC. L'Azienda opera sul territorio di Roma Capitale, che ricopre un'area di 1.300 kmq e che ingloba un bacino di utenza di quasi 3 milioni di cittadini.

Nel 2014 ATAC ha prodotto, con una flotta di circa 2100 autobus, 154 milioni di chilometri del servizio pubblico di linea, trasportando oltre 1.300 milioni di passeggeri. La produzione complessivamente erogata per le metropolitane è stata di circa 40 milioni di vetture-km mentre per la rete di superficie (tram e autobus) è stata di circa 97,5 milioni di vetture-km. A questa produzione vanno aggiunti 28 milioni di vetture-chilometro/annuo del servizio della rete periferica del TPL concessi in affidamento alla società Roma TPL Sc.a.r.l..

In relazione al servizio di superficie, il numero complessivo di mezzi in circolazione al 31-12-2014 è stato pari a 2358, in particolare 2148 autobus con un'età media di 9,4 anni e 164 tram con un'età media di 31,3 anni. Per quanto riguarda il servizio metro-ferroviario, il numero complessivo di treni in circolazione è pari a 168 (100 metropolitane e 68 ferrovie metropolitane) con un'età media di 22,3 anni.

Tabella 5. Produzione 2014 del servizio metro-ferroviario (fonte: Bilancio ATAC 2015)

	CORSE	TRENI KM	VETTURE KM	VETTURE KM fuori linea	POSTI KM OFFERTI
METROPOLITANE					
LINEA "A"	184.216	3.393.996	20.363.974	897.936	4.082.976.688
LINEA "B"	185.168	3.213.984	19.283.906	1.275.486	3.998.196.432
LINEA "C"	6.790	82.008	492.042	24.954	97.083.933
TOTALE METROPOLITANE	376.174	6.689.988	40.139.922	2.198.376	8.178.257.053
FERROVIE					
ROMA-LIDO	53.927	1.528.012	9.168.077	59.190	1.965.023.161
ROMA-GIARDINETTI	99.697	804.016	2.150.076	15.641	215.867.630
ROMA-VITERBO	66.746	1.570.458	4.711.375	60.982	896.543.056
<i>di cui</i>					
<i>urbane</i>	52.435	655.103	1.965.310	35.728	411.404.787
<i>extraurbane</i>	14.311	915.355	2.746.066	25.253	485.138.270
TOTALE FERROVIE	220.370	3.902.486	16.029.528	135.812	3.077.433.847
TOTALE	596.544	10.592.474	56.169.450	2.334.188	11.255.690.900

Nella tabella seguente il dettaglio per tipologia di trasporto del servizio di superficie.

Tabella 6. Produzione 2014 del servizio di superficie (fonte: Bilancio ATAC 2015)

	VETTURE KM	VETTURE KM fuori linea
PRODUZIONE DIRETTA ^(*)		
Servizio Linea Tram ^(**)	4.245.549	27.326
Servizio Linea Bus	71.924.501	4.955.298
Servizio Bus a Metano	17.175.465	729.790
Servizio Linea Bus Elettrici	551.866	36.649
Servizio Linea Filobus	368.716	16.731
TOTALE PRODUZIONE DIRETTA	94.266.097	5.765.794
PRODUZIONE INDIRETTA		
Servizio Notturmo	3.327.732	
Altri servizi subaffidati	-	
TOTALE PRODUZIONE INDIRETTA	3.327.732	
TOTALE	97.593.829	5.765.794

La rete TPL di Roma è disponibile in formato GTFS (General Transit Feed Specification) nella pagina “Open Data” del sito del Comune di Roma (<http://dati.comune.roma.it/>).

Il GTFS è uno standard nato per definire orari e informazioni geografiche legate a reti pubbliche e private di trasporto. Le tabelle CSV correlate descrivono delle operazioni sulle tabelle degli orari del sistema di trasporto (Figura 8).

Tabella 7. La collezione dei file del TPL nel formato GTFS

Filename	Required	Defines
agency.txt	Required	One or more transit agencies that provide the data in this feed.
stops.txt	Required	Individual locations where vehicles pick up or drop off passengers.
routes.txt	Required	Transit routes. A route is a group of trips that are displayed to riders as a single service.
trips.txt	Required	Trips for each route. A trip is a sequence of two or more stops that occurs at specific time.
stop_times.txt	Required	Times that a vehicle arrives at and departs from individual stops for each trip.
calendar.txt	Required	Dates for service IDs using a weekly schedule. Specify when service starts and ends, as well as days of the week where service is available.
calendar_dates.txt	Optional	Exceptions for the service IDs defined in the calendar.txt file. If calendar_dates.txt includes ALL dates of service, this file may be specified instead of calendar.txt.
fare_attributes.txt	Optional	Fare information for a transit organization's routes.
fare_rules.txt	Optional	Rules for applying fare information for a transit organization's routes.
shapes.txt	Optional	Rules for drawing lines on a map to represent a transit organization's routes.
frequencies.txt	Optional	Headway (time between trips) for routes with variable frequency of service.
transfers.txt	Optional	Rules for making connections at transfer points between routes.
feed_info.txt	Optional	Additional information about the feed itself, including publisher, version, and expiration information.

I dati sono strutturati specificamente per fornire le funzionalità di pianificazione di un viaggio, ma possono essere anche utilizzate per altre applicazioni come ad esempio l’analisi del livello di servizio e altre misure prestazionali.

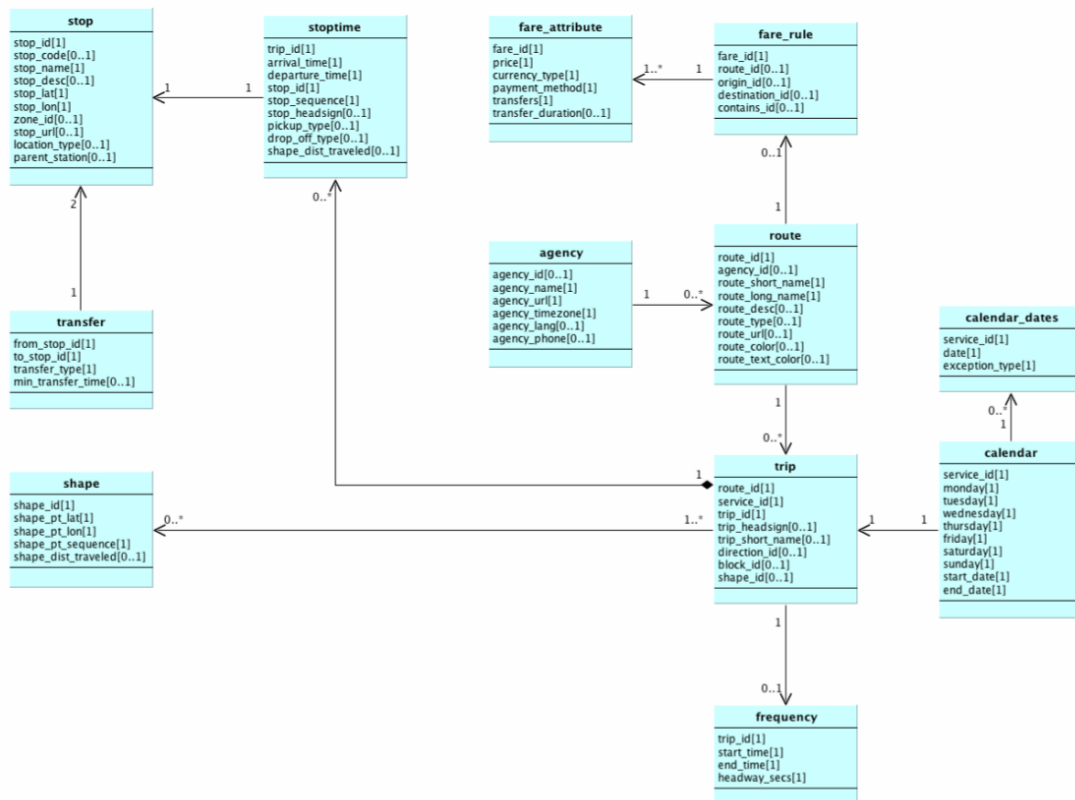


Figura 8. Le relazioni tra i diversi file della rete del TPL nel formato GTFS

Gli open data del TPL romano includono in particolare tutte le informazioni sul tracciato delle linee, sulle fermate e sugli orari per tipologia di giornata: feriali, semifestiva e festiva. Gli open data utilizzati riguardano il servizio programmato nelle seguenti 4 giornate: Lunedì 11 Aprile 2016, Sabato 23 Aprile 2016, Domenica 24 Aprile 2016 e Giovedì 5 Maggio 2016.

La rete del TPL di superficie del Comune di Roma è formata da 8.719 fermate e da 10.679 collegamenti tra fermate per una lunghezza complessiva di circa 5.000 chilometri; Il servizio è costituito da 324 linee con 34.417 corse nei giorni feriali, da 328 linee con 29.078 corse nei giorni semifestivi e da 285 linee con 1.938 corse nei giorni festivi. La produzione chilometrica ammonta a circa 383.000 km nei giorni feriali, a circa 329.000 Km nei giorni semifestivi e a circa 235.000 km nei giorni festivi.

Il 90% della flotta è equipaggiato con ricevitore GPS e dispositivi per il collegamento dati con la centrale operativa che consentono il monitorare diverse grandezze (posizione, velocità, tempi di percorrenza, ecc.) del veicolo durante il servizio e di fornire informazioni aggiornate ai cittadini tramite APP dedicate o attraverso le 300 paline intelligenti

4 Approccio e risultati della valutazione ambientale

La valutazione ambientale di scenari evolutivi del parco veicoli circolante è basata sulla stima dei consumi energetici e delle emissioni complessive, su base annua e sull'intero territorio della provincia di Roma, per i principali inquinanti emessi dal parco auto circolante e dalla flotta bus impiegata per il TPL.

Il processo di valutazione analizza la situazione attuale e mette a confronto due scenari evolutivi alternativi del parco circolante con orizzonte temporale fino all'anno 2025.

Il primo scenario, meno favorevole alla diffusione dei veicoli elettrici, prevede un'evoluzione dell'attuale parco auto circolante in linea con i trend del mercato automobilistico e le previsioni di crescita delle vendite di auto ibride e a metano. L'evoluzione del parco circolante riprodotta nel primo scenario considera in particolare un tasso di rinnovo annuo del parco auto del 5% fino al 2025 con una incidenza delle auto ibride del 3% sulle nuove auto.

Il secondo scenario, più ottimistico rispetto al primo, assume le stesse ipotesi di rinnovo del parco attuale circolante ed un tasso di penetrazione delle auto elettriche del 10% per il 2025.

Per quanto riguarda il servizio TPL su bus del Comune di Roma si considera la sostituzione del 30% dell'attuale flotta, con nuovi autobus con omologazione ambientale "EURO 6" nel primo scenario e con autobus a trazione elettrica nel secondo scenario. Gli autobus sostituiti sono quelli più vecchi ed inquinanti con classe di omologazione "EURO 2" ed in parte "EURO 3".

Lo scenario attuale di riferimento include i dati 2015 dell'ACI relativi al parco auto circolante della provincia di Roma, nonché i dati più recenti sulla composizione della flotta autobus (2015) per classe di omologazione ambientale. Lo scenario attuale è inoltre basato sulle stime di mobilità veicolare, ricavate con le collezioni FCD e i conteggi di traffico, entrambi riferiti al 2013, nonché sulle stime di produzione annua di autobus-km calcolata a partire dagli Open Data relativi al servizio TPL rilasciati dall'Agenzia per la Mobilità di Roma per tre giornate tipo relative al mese di aprile 2016.

Per quanto riguarda i due scenari evolutivi alternativi del parco circolante si assumono invariate rispetto allo scenario attuale sia l'entità della mobilità veicolare privata che la produzione annua del TPL.

Le stime dei consumi energetici e delle emissioni di climalteranti sono effettuate prendendo in considerazione l'intera catena energetica (Well-To-Wheel, abbreviato in WTW, letteralmente "dal pozzo alla ruota") che va dall'estrazione e trasporto della fonte primaria di energia, alle sue eventuali trasformazioni e distribuzione ed, infine, alla quantità di energia usata dal veicolo per effettuare lo spostamento.

Per quanto riguarda le emissioni, la mancanza di dati certi, omogenei e completi sui processi a monte delle centrali termoelettriche e delle raffinerie, processi complessi che avvengono al di fuori del territorio nazionale, non permette di poter calcolare emissioni WTW affidabili, per cui gli inquinanti atmosferici emessi sono calcolati dalla fase di produzione fino alla fase d'uso (PTW).

Il passaggio all'auto elettrica è senza dubbio una delle principali soluzioni per eliminare le emissioni di sostanze inquinanti e gas climalteranti nei centri urbani. Su scala regionale e planetaria i vantaggi ambientali della mobilità elettrica sono comunque legati al mix di fonti primarie utilizzate che sarà adottato per far fronte al surplus di domanda di energia elettrica.

4.1 Parametri e procedimento per il calcolo dei consumi di energia finale e primaria

La valutazione energetica globale della mobilità veicolare è generalmente effettuata considerando l'intero ciclo di vita del vettore energetico (benzina, gasolio, CNG, GPL ed energia elettrica), dalla materia prima alle ruote.

Questo approccio rende confrontabili tra loro diverse tecnologie propulsive e carburanti, sia dal punto di vista dell'efficienza del mezzo di trasporto, sia del rendimento della tecnologia che permette di ottenere il combustibile ed il vettore energetico usato per trasportarlo e/o immagazzinarlo.

Il ciclo **WTW** può essere schematicamente suddiviso in 3 fasi distinte:

1. **WTP** (Well To Processing), che si riferisce alla produzione e al trasporto della materia prima;
2. **PTT** (Processing To Tank), che comprende la produzione e la distribuzione del vettore energetico;
3. **TTW** (Tank to Wheel), che riguarda l'utilizzo del vettore energetico da parte del veicolo.

Per il confronto fra i vettori energetici considerati, occorre considerare i rendimenti energetici di ogni fase (WTP, PTT e TTW) al fine di raggiungere un risultato finale che rappresenti l'efficienza globale del vettore energia primaria alle ruote dei veicoli.

Tabella 8 sono riportati i rendimenti energetici di ogni fase per i diversi vettori energetici. Considerando l'intero ciclo di vita, la migliore efficienza è ottenuta dai veicoli elettrici (39%) grazie soprattutto alla consistente percentuale di energia elettrica (circa 34%) prodotta con fonti rinnovabili.

Tabella 8. Rendimenti energetici per fase del ciclo di vita dei vettori

	WTP	PPT	TTW	WTT	WTW
	Well To Processing	Processing To Tank	Tank To Wheel	Well To Tank	Well To Wheel
Benzina	94.3%	91.6%	17.6%	86.4%	15.2%
Gasolio	93.3%	90.9%	21.5%	84.8%	18.2%
GPL	92.9%	97.3%	18.0%	90.4%	16.3%
CNG	92.4%	94.0%	18.1%	86.9%	15.7%
Energia Elettrica (termoelettrica)	91.0%	34.7%	82.9%	31.6%	26.2%
Energia Elettrica (fonti rinnovabili)	100.0%	79.6%	82.9%	79.6%	66.0%
Energia Elettrica (mix Italia 2015)	94.1%	50.0%	82.9%	47.0%	39.0%

Nella fase PPT del vettore "energia elettrica" sono stati considerati il rendimento medio di conversione del parco elettrico nazionale, nonché le perdite della rete per il trasporto e la distribuzione dell'elettricità dalle centrali di produzione elettrica al luogo di fornitura. Secondo TERNA la rete italiana ha disperso circa il 6,3% dell'energia elettrica richiesta nel 2014.

Il rendimento medio (63%) del mix Nazionale di produzione di energia elettrica è stato determinato considerando un rendimento di conversione delle centrali termiche del 43,6% ed una quota percentuale di energia da fonti rinnovabili pari al 34%. Nella produzione termoelettrica il mix di combustibili è stato radicalmente modificato negli ultimi anni, con sempre più marcata prevalenza del gas naturale e con la progressiva scomparsa dei prodotti petroliferi. Va segnalato che nel 2014 il rendimento elettrico netto per unità di contenuto energetico di gas naturale è stato del 53,5%, mentre per i prodotti petroliferi è intorno al 34,2%.

Sempre nella fase PPT si considerano le perdite che si verificano sia nelle stazioni di ricarica, il cui rendimento si attesta tra l'86% e il 92,6%, per potenze che vanno da 3kW a 50 kW, sia nelle batterie durante le fasi di carica e scarica. In queste fasi le batterie di accumulo agli ioni di litio presentano rendimenti che variano tra il 94% ed il 97% per potenze che vanno da 50kW a 3kW.

In Figura 9 sono illustrati i singoli processi relativi alla fase PTT del vettore elettricità con i relativi rendimenti.

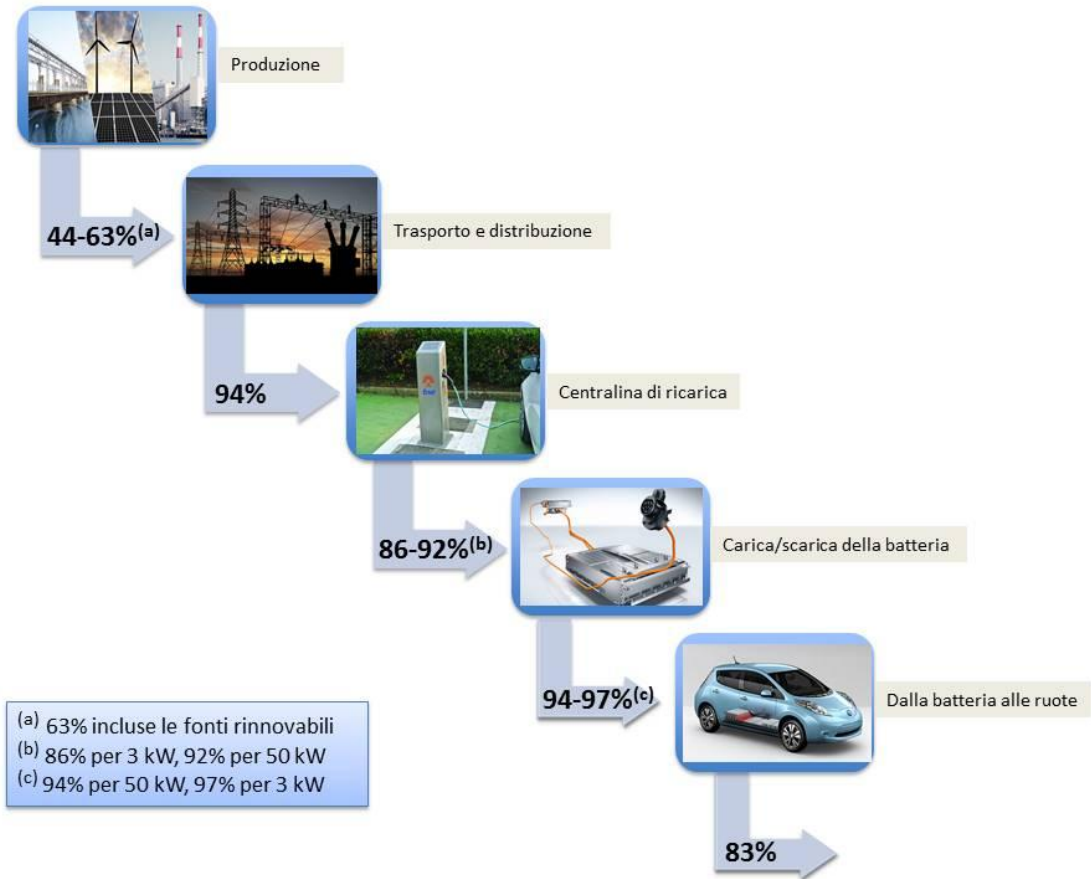


Figura 9. Efficienza energetica del vettore elettricità dalla produzione alla batteria

Nella fase TTW il flusso energetico erogato dalla batteria subisce altre perdite che dipendono dai rendimenti dell'inverter (circa 95%), del motore elettrico (circa 90%) e degli organi di trasmissione (circa il 97%).

La valutazione dei benefici in termini energetici ed ambientali degli scenari di mobilità elettrica si basa sui risultati dei calcoli eseguiti del software ECOTRIP per le diverse tipologie di veicoli presi in considerazione.

Il calcolo, riferito sia allo scenario di riferimento attuale che ai due scenari prospettici, fornisce come risultato i consumi nella fase TTW. I consumi sono espressi in kWh per i veicoli elettrici e in grammi per i veicoli con motore a combustione interna; per quest'ultima categoria di veicoli viene inoltre fornito il consumo energetico in kWh in base ai poteri calorifici dei singoli carburanti. Per i veicoli a combustione interna il calcolo fornisce inoltre la quantità di inquinanti emessi espressa in grammi.

Una volta calcolati i consumi energetici ($E_{TTW}^{(v)}$) dei veicoli per singolo vettore energetico si è analizzato l'intero ciclo dell'energia per determinare i consumi, in termini di fonti primarie, e le emissioni globali. Il calcolo dell'energia primaria è strettamente legato al tipo di risorsa utilizzata.

Per calcolare i consumi di energia primaria a partire dal consumo dei veicoli si è considerato il rendimento energetico $\eta_{WTT}^{(v)} = \eta_{WTP}^{(v)} * \eta_{PTT}^{(v)}$ (

Tabella 8). In questo caso l'energia primaria consumata ($E_p^{(v)}$) per singolo vettore energetico è non rinnovabile ed è pari a:

$$E_p^{(v)} = \frac{E_{TTW}^{(v)}}{\eta_{WTT}^{(v)}}$$

dove l'apice ν fa riferimento al vettore energetico (benzina, gasolio GPL, CNG, energia elettrica).

4.2 Il Mix energetico Nazionale per la produzione di energia elettrica

La composizione per fonte della produzione di energia elettrica è un elemento discriminante per la valutazione delle emissioni indirette dei veicoli elettrici. Diversamente dai veicoli convenzionali, la generazione degli inquinanti non avviene direttamente su strada ma in località distanti anche centinaia di chilometri dal luogo di utilizzo dell'energia.

L'emissione di sostanze considerate pericolose per l'ambiente e la salute umana è legata alla tipologia di generazione dell'energia elettrica ossia al tipo di centrale utilizzata. In Italia nel 2015 la produzione lorda di energia elettrica è stata di 270.703 GWh di cui 180.871 GWh sono stati originati da impianti termoelettrici e 89.832 GWh da impianti con fonti rinnovabili (Fonte: Terna-Rete Italia [4]). Includendo la quantità di energia importata (50.846 GWh), quella esportata (4.450 GWh) e il consumo per i pompaggi (1.850 GWh), la richiesta complessiva di energia elettrica registrata nel 2015 è risultata pari a 315.234 (GWh).

Nel 2015 la percentuale dell'offerta di energia elettrica prodotta in Italia dalle centrali termiche è stata pari al 66,6% al netto dei servizi ausiliari e dei consumi per pompaggi. Rispetto alla richiesta complessiva di energia elettrica, la percentuale dell'offerta di energia elettrica prodotta in Italia dalle centrali termiche è pari al 56,8% (Figura 10).

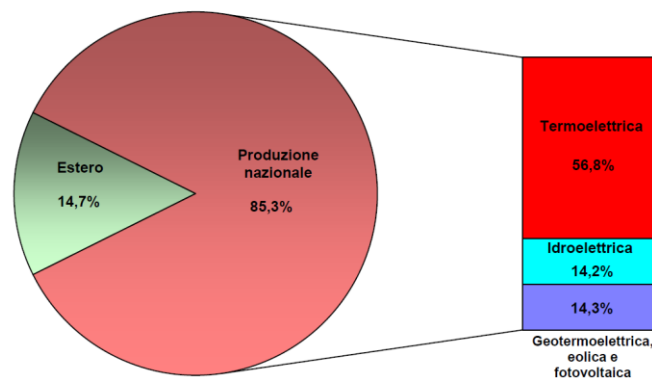


Figura 10. Composizione % dell'offerta di energia elettrica

La produzione termoelettrica è fondata sul gas naturale per il 53,4 % e sul carbone per un altro quarto (24,8%) . Il ricorso a combustibili liquidi come gasolio o oli pesanti è ormai ridotto al 2,7% come mostrato in Figura 11.

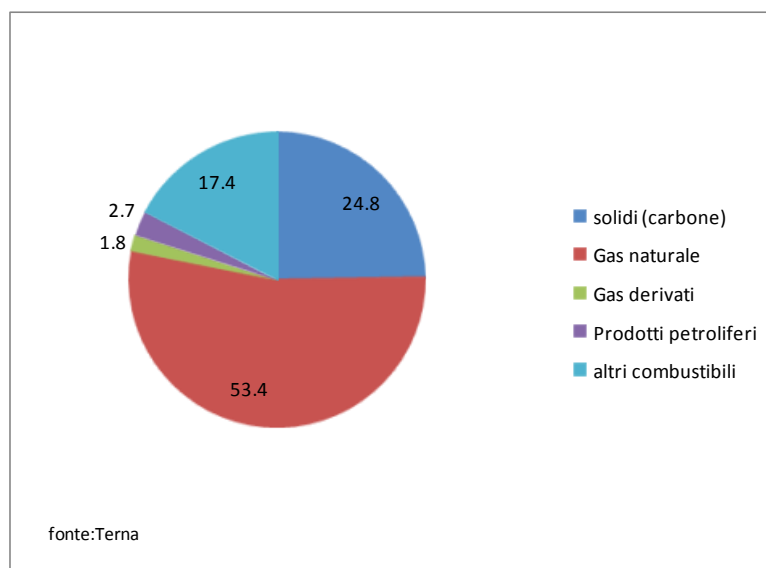


Figura 11. Produzione percentuale energia termoelettrica lorda in Italia 2014

La composizione del mix energetico nazionale è leggermente diversa poiché si riferisce alla composizione reale dell'energia elettrica disponibile sulla rete e venduta ai clienti finali tenendo presente anche gli apporti energetici derivanti da acquisti extra-nazionali.

Come indicato dal GSE (Gestore Servizi Energetici) [5] le procedure poste in atto dal medesimo consentono di determinare, attraverso la tracciatura delle fonti energetiche, la composizione dell'energia elettrica fornita ai clienti finali.

La Tabella 9 mostra la composizione percentuale come fornita dal GSE [www.gse.it] per l'anno 2014. Da essa si evince la presenza della fonte nucleare per la quota di importazione di energia elettrica. Infatti per questa frazione acquistata fuori i confini nazionali viene attribuita la composizione media europea aggiornata annualmente comprendente anche la fonte nucleare.

Tabella 9. Composizione mix energetico produzione EE 2014 (fonte GSE)

Composizione mix energetico nazionale per la produzione energia elettrica immessa nel sistema elettrico nazionale 2014	
Fonte primaria	%
Rinnovabile	43.11
Carbone	18.98
Gas naturale	28.56
Prodotti petroliferi	1
Nucleare	4.64
Altro	3.72

La diversità tra composizione della produzione e del mix venduto sulla rete impone una riflessione su quale delle due è maggiormente di interesse al fine di valutare i fattori emissivi nazionali per la mobilità elettrica. Consideriamo le due differenti possibilità:

- nel primo caso si considera l'energia elettrica utilizzata per la ricarica dei veicoli come prodotta esclusivamente sul territorio nazionale e quindi l'emissione degli inquinanti riflette la composizione della produzione nazionale;
- nel secondo caso si esamina solo la vendita dell'energia disponibile sulla rete e questa tiene presente il saldo di importazione ivi compresa la quota nucleare.

In base alla prima ipotesi la determinazione delle emissioni è a totale carico della produzione nazionale di cui è possibile valutare, tramite la composizione delle fonti di generazione, i fattori emissivi. Nella seconda ipotesi rimane l'incertezza dovuta alle quote di import ed export dell'energia ed al suo saldo.

Inoltre parte dell'energia non è prodotta sul territorio nazionale e quindi andrebbe considerata ad emissione nulla nel quadro complessivo Italiano. Per una valutazione degli effetti dell'elettrificazione in termini di maggiori oneri produttivi è preferibile utilizzare l'ipotesi di produzione totalmente indigena che risulta essere maggiormente conservativa.

I fattori emissivi che verranno utilizzati sono ricavati dai dati prodotti dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) per l'anno 2014 in 3 rapporti annuali diversi: l'Informativa Inventory Report [6] per le emissioni di CO, NO_x, Non Methanic VOC, PM e SO_x, il National Inventory Report [7] per le emissioni di metano, e il foglio elettronico dei "Fattori di emissione di CO₂ della produzione e consumo energia elettrica" per la CO₂ [8]. E' necessario stimare i fattori di emissione rispetto a quelli di ISPRA perché sono necessari i valori in funzione dell'energia elettrica prodotta e non di quella consumata per la produzione di energia elettrica, come dato da ISPRA secondo il metodo CORINAIR e IPCC. Utilizzando le emissioni totali annue e l'energia elettrica prodotta, comprensiva di quella da Fonti Energetiche Rinnovabili, di cui si assumono emissioni e consumi nulli, si ottengono i fattori di emissione riportati in Tabella 10.

Tabella 10: Fattori di emissione della produzione di energia elettrica in Italia (g/kWh) – anno 2014

PTT	Fattori di Emissione (g/kWh)
CO	0,06203
NO _x	0,13142
NMHC	0,00786
CH ₄	0,01293
PM	0,00293
SO _x	0,06785
CO ₂ [*]	326,6304

Fonte: elaborazioni ENEA su dati ISPRA - *: dato ISPRA

4.3 Parametri e procedimento per il calcolo delle emissioni globali

Come per l'energia elettrica, anche per i carburanti le emissioni di inquinanti vengono calcolate solo per la fase PTT, dal momento che il petrolio e il gas utilizzati sono per la maggior parte d'importazione, e i dati delle emissioni della fase di estrazione all'estero e trasporto verso l'Italia non sono completi e omogenei.

Per il calcolo delle emissioni globali sono state quindi considerate le seguenti 2 fasi:

1. **PTT** (Production To Tank), che si riferisce alle emissioni inquinanti indirette immesse nell'atmosfera derivanti dalla produzione e distribuzione del vettore energetico;
2. **TTW** (Tank to Wheel), che riguarda le emissioni dirette derivanti dalla fase d'uso, cioè dal combustibile consumato direttamente dal veicolo, dal serbatoio alla ruota.

I fattori di emissioni sono ricavati allo stesso modo dai dati ISPRA, dovendoli esprimere in funzione del carburante prodotto e non dell'energia consumata, tranne che nel caso delle emissioni fuggitive della fase di trasporto in gasdotto e di venting/flaring di gas in raffineria, per cui valgono i fattori ISPRA, già espressi in funzione del gas distribuito e dei prodotti petroliferi finali.

I dati di produzione dei carburanti necessari per la stima dei fattori di emissione in funzione della produzione sono stati presi dal Bilancio Energetico Nazionale [9].

I fattori di emissione degli inquinanti della fase PTT così stimati sono riportati in Tabella 11.

Tabella 11. Fattori di emissione nella fase WTT

Agente inquinante	Benzina (g/kwh)	Gasolio (g/kwh)	GPL (g/kwh)	CNG (g/kwh)	Elettricità (g/kwh)
CO	0.0042	0.0042	0.0020	0.0000	0.0918
HC	0.1057	0.0699	0.0328	0.5972	0.0281
NO _x	0.0221	0.0221	0.0104	0.0000	0.1948
Polveri	0.0009	0.0009	0.0004	0.0000	0.0043
SO _x	0.0454	0.0454	0.0214	0.0000	0.1150
CO ₂	33.341	33.341	15.670	0.993	323.627

Fonte: elaborazioni ENEA su dati ISPRA

Una volta determinate le emissioni dirette ($P_{TTW}^{(v,i)}$) per singolo vettore energetico e sostanza inquinante è stato calcolato il contributo alle emissioni globali ($P_{PTT}^{(v,i)}$) di ciascun vettore energetico relativamente alla fase PTT in base al consumo in fase d'uso.

Le emissioni globali ($P_{PTW}^{(v,i)}$) per singolo inquinante e vettore energetico risultano pertanto uguali a:

$$P_{PTW}^{(v,i)} = P_{PTT}^{(v,i)} + P_{TTW}^{(v,i)}$$

4.4 Consumi ed emissioni del parco auto circolante

La valutazione ambientale di scenari di elettrificazione del parco auto circolante sul territorio provinciale di Roma è basata su dati di mobilità elaborati a partire da due collezioni di FCD.

La prima collezione comprende tutte le tracce GPS registrate, nel mese di Maggio 2013, sul territorio della provincia di Roma da circa 150 mila veicoli equipaggiati con unità di bordo gestita dal Centro Servizi di Octotelematics. La seconda collezione include invece tutte le tracce GPS registrate, nel corso dell'anno 2013 e senza limitazione territoriale, da un sottoinsieme di veicoli (poco più di 30 mila) della prima collezione registrati a Roma.

La procedura di calcolo dei consumi e delle emissioni inquinanti è stata applicata ai singoli viaggi effettuati dai veicoli appartenenti alla prima collezione di FCD. Il calcolo è stato preceduto da una fase preliminare di elaborazione degli FCD per l'estrazione dei viaggi, la ricostruzione dell'insieme dei tragitti percorsi sulla rete stradale e l'aggregazione per fascia oraria dei transiti dei veicoli sonda in corrispondenza delle spire di traffico presenti sulla viabilità romana. Il confronto dei transiti orari dei veicoli sonda con i corrispondenti conteggi di traffico effettuati dalle spire induttive ha consentito di valutare la rappresentatività statistica dei veicoli sonda e, quindi, di proiettare le stime mensili dei consumi e delle emissioni di inquinanti relative al campione di veicoli sonda al traffico automobilistico complessivo della provincia di Roma. L'incidenza percentuale media dei veicoli sonda risultante è pari al 6,43% con un intervallo di variabilità tra il 6,31% ed il 6,54% corrispondente ad un livello di confidenza del 95%.

Le stime mensili sui consumi e sulle emissioni di inquinanti relative al traffico automobilistico complessivo sono state successivamente estese all'intero anno 2013 in base alle percorrenze annuali effettuate dal campione di veicoli appartenenti alla seconda collezione di FCD. La proiezione dei consumi e delle emissioni all'intero anno è stata elaborata considerando la percentuale delle percorrenze realizzate nel mese di maggio (8,8%) sul totale percorso dal campione di veicoli.

Le proiezioni all'intero anno delle percorrenze effettuate dagli autoveicoli sul territorio della provincia di Roma sono risultate pari a poco più di 20x10⁹ chilometri con un'incidenza delle percorrenze delle auto con motore a benzina e diesel intorno al 90%. I consumi annuali di gasolio e benzina calcolati ammontano a poco più di 500 ktep e 600 ktep rispettivamente.

Per le valutazioni ambientali degli scenari al 2025 sono state considerate immutate sia l'entità che la struttura del traffico stimato per la situazione attuale. I due scenari evolutivi sono stati diversificati in relazione a diverse ipotesi di composizione del futuro parco circolante. Il primo scenario, meno ottimistico per la mobilità elettrica, considera soltanto la sostituzione delle auto più vecchie ed inquinanti con nuove auto con classe di omologazione ambientale EURO 6; il secondo scenario, decisamente più favorevole, prevede al 2025 un tasso di penetrazione delle auto elettriche pari al 10% del parco auto circolante. Per entrambi gli scenari evolutivi è stato supposto un tasso di sostituzione annua del parco auto del 5%, un'incidenza delle auto ibride del 3% sul numero totale di auto sostituite annualmente ed una maggiore penetrazione dei veicoli a metano al 2025. In base a queste ipotesi di rinnovo del parco auto, al 2025 circa il 50% delle attuali auto in circolazione sarà sostituito con nuove auto.

In Figura 12 è riportata la composizione del parco nei tre scenari esaminati.

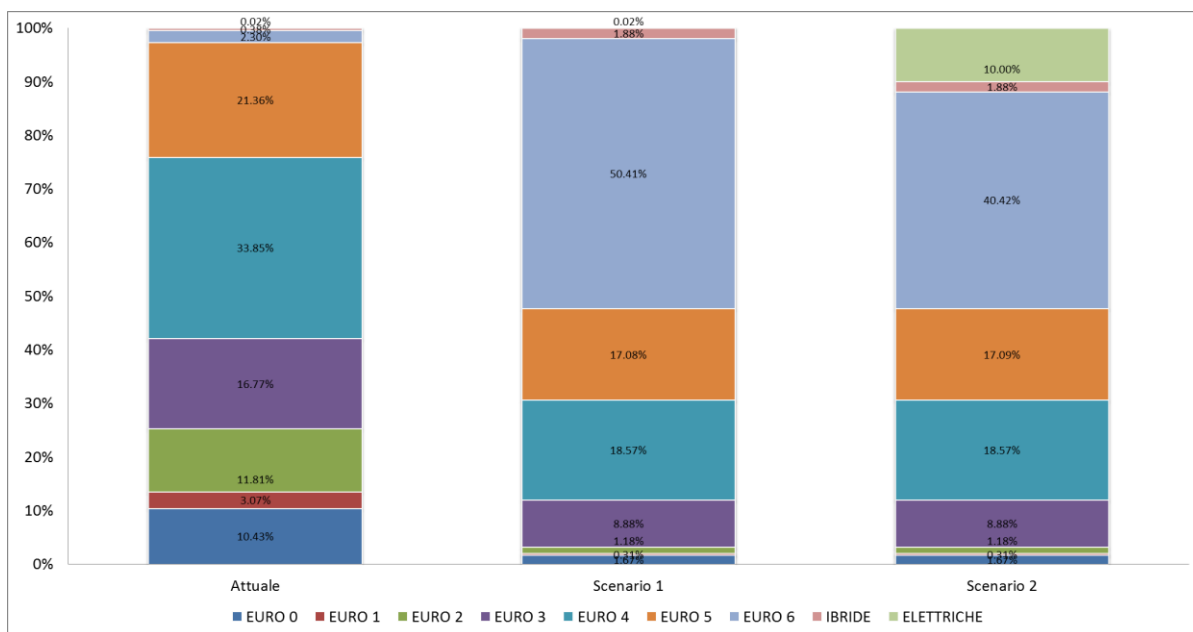


Figura 12. Composizione del parco auto per classe ambientale

I calcoli eseguiti sugli scenari evolutivi evidenziano una riduzione dei consumi finali rispetto alla situazione attuale intorno a 98,7 ktep e a 184,4x ktep rispettivamente per lo scenario "1" e "2".

Lo scenario "2" mostra, in particolare, una riduzione del consumo annuale di carburante (gasolio e benzina) di circa 236,4 ktep rispetto allo scenario attuale e di circa 116,6 ktep rispetto allo scenario 1. Il consumo annuale di energia elettrica nello scenario 2 ammonta a poco meno di 371,1 GWh corrispondente a circa il 2,5% del consumo annuo di energia registrato nella provincia Roma nel 2015.

A partire dai valori di consumo energetico annuale corrispondente alla fase d'uso del combustibile (TTW) sono stati stimati i consumi annuali relativi all'intero ciclo di vita WTW (Well-To-Wheel) del vettore energetico in base ai rendimenti energetici riportati in

Tabella 8.

I risultati sui consumi energetici relativi alle fasi WTW, sempre aggregati per tipologia di alimentazione sono illustrati in Figura 13.

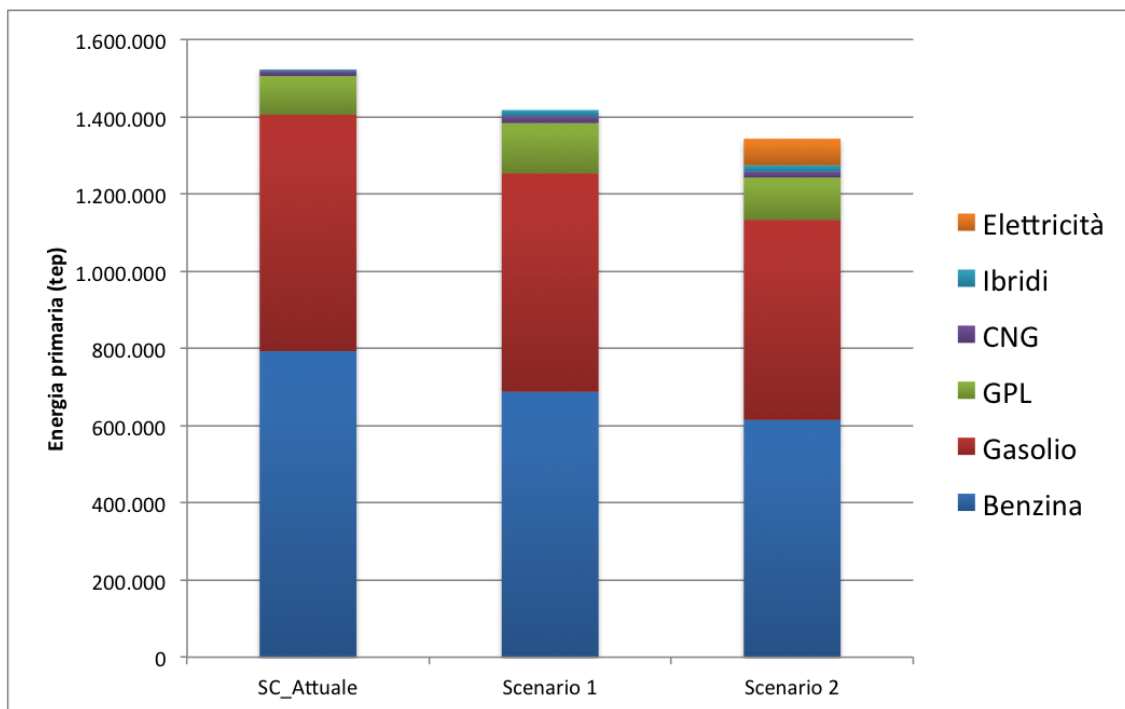


Figura 13. Consumi di energia primaria del trasporto privato (auto)

I risultati del calcolo evidenziano una riduzione dei consumi di energia primaria rispetto allo scenario attuale di circa 115,2 ktep (circa il 7,5%) per lo scenario 1 e di circa 184,5 ktep (intorno all'12,1%) per lo scenario "2".

Tenendo conto dei rendimenti della rete di distribuzione, delle stazioni di ricarica e delle batterie durante le fasi di carica e scarica, la produzione annua di energia elettrica necessaria per alimentare le auto elettriche è pari a circa 472 GWh. La produzione di energia elettrica necessaria a soddisfare il consumo giornaliero delle auto elettriche si attesta intorno a 1,45 GWh nei giorni feriali e a 1,18 GWh nei giorni festivi.

Una volta calcolate le emissioni dirette su base annua, derivanti dal combustibile consumato direttamente dal parco auto circolante, sono state quantificate le emissioni indirette generate per la produzione e la distribuzione del combustibile fossile. Per i consumi di energia elettrica da parte dei veicoli elettrici sono state quantificate le emissioni di inquinanti prodotte dalle centrali di produzione dell'energia elettrica.

Per il calcolo delle emissioni indirette sono stati utilizzati i fattori di emissione riportati nella Tabella 13.

I risultati del calcolo relativi allo scenario "2" mostrano una significativa riduzione della CO₂ equivalente rispetto allo scenario attuale e allo scenario "1" di circa il 13,4% e 6,9% rispettivamente. Nel calcolo della CO₂ equivalente è stato considerato il contributo complessivo delle emissioni di biossido di carbonio e di metano (1 t di CH₄ = 21 t di CO₂ eq).

In Figura 14 sono riportate le riduzioni percentuali delle emissioni inquinanti ottenibili nei due scenari evolutivi rispetto allo scenario attuale.

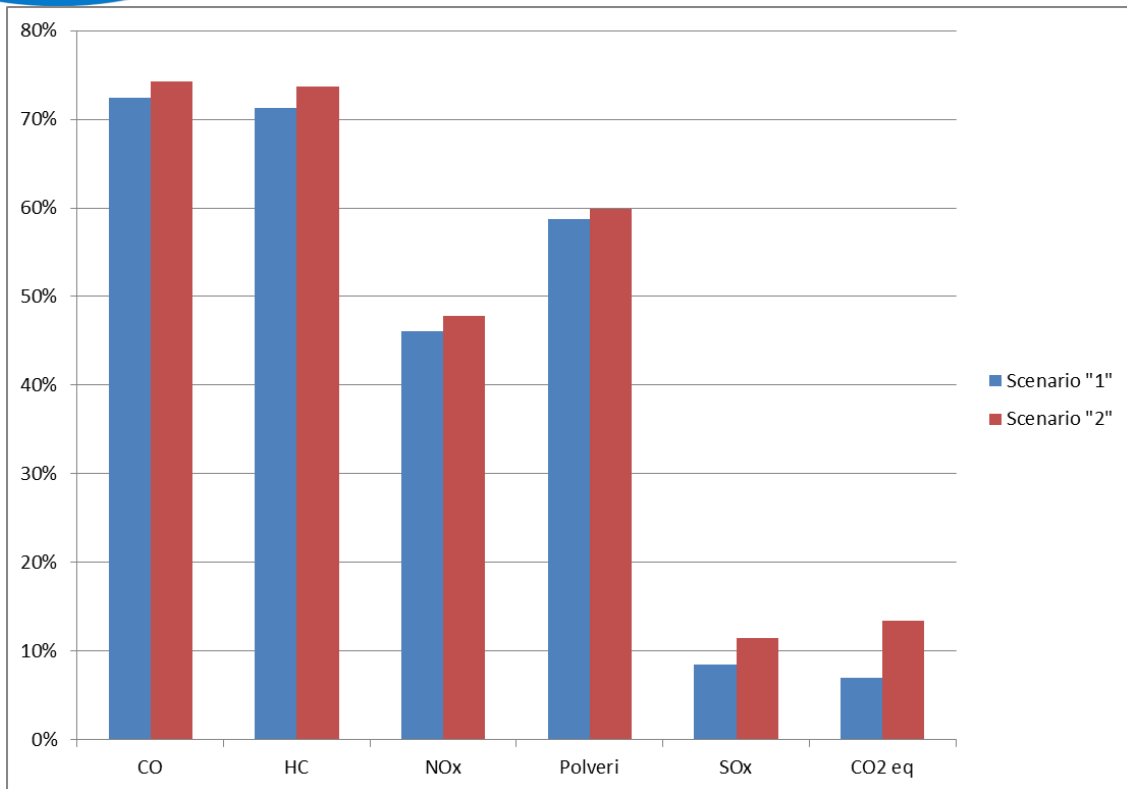


Figura 14. Riduzioni percentuali delle emissioni globali PTW per i due scenari evolutivi del parco auto

Per entrambi gli scenari evolutivi risulta un significativo calo delle emissioni di inquinanti soggetti a limiti normativi. Va comunque segnalato che nel caso dello scenario "1" l'entità delle riduzioni è certamente superiore a quella conseguibile realmente. Infatti le funzioni emissione-velocità associate alle auto omologate EURO 5 ed EURO 6 sono attualmente sottoposte a nuove verifiche alla luce dei risultati delle recenti misure effettuate nelle reali condizioni di guida (Real Driving Emission - RDE) sia dal JRC per conto dell'UE [11], sia da altri Laboratori su incarico dei Ministeri dei Trasporti dei vari Stati Membri.

Queste misurazioni hanno evidenziato che le emissioni reali dei veicoli stradali sono maggiori di quelle misurate in laboratorio su cicli standard. In particolare le emissioni di NOx dei motori diesel EURO 5 ed EURO 6 presentano una variabilità molto alta e non corrispondono ai requisiti dichiarati dai costruttori (rispetto al limite di 80 mg/km le emissioni specifiche ottenute da TNO in uno studio del 2015 risultano variare da 50 a 2000 mg/km) [12].

In conseguenza di questi risultati, la Commissione Europea ha recentemente emanato due nuovi regolamenti (247/2016 e 646/2016) per prescrivere nuovi test in condizioni reali per le emissioni di inquinanti, con le fasi di sperimentazione prima e di obbligo poi, e i rispettivi fattori di conformità realistici e i relativi limiti "NTE" (not-to-exceed). Sono, inoltre, in fase di discussione nuove regolamentazioni: per la misura del numero di particelle (PN), delle emissioni "a freddo" e delle emissioni dei veicoli ibridi. Ci sono anche proposte sulla revisione dei livelli di emissione di CO₂ e dei consumi in condizioni reali. Quindi è presumibile assumere che le riduzioni di emissioni dello scenario "1" siano molto più contenute, soprattutto per gli NO_x.

4.5 Consumi ed emissioni del servizio TPL su gomma

Come già sottolineato precedentemente, nel processo di valutazione ambientale degli scenari di mobilità elettrica nell'area metropolitana di Roma è stato preso in considerazione anche il rinnovo della flotta degli autobus che svolgono servizio di TPL.

La valutazione è stata effettuata a partire dal dataset completo del TPL dell'intera città di Roma pubblicato sul portale "Open Data" del Comune di Roma. Il dataset ha un aggiornamento molto frequente e contiene

sia la programmazione (corse, orari e fermate), che la cartografia (capilinea, fermate e tratte tra fermate geo-referenziate) delle linee urbane di superficie.

Ai fini della valutazione si è considerata la programmazione del servizio per tipo di giornata (feriale, prefestiva, festiva) pubblicata nel mese di Aprile 2016.

La procedura di calcolo dei consumi di carburante e delle emissioni di inquinanti è stata applicata a tutte le corse previste dal programma di esercizio di ciascuna giornata tipo. I dati di input utilizzati nella procedura di calcolo hanno riguardato il percorso effettuato tra due fermate consecutive e il tipo di autobus impegnato nella corsa.

I dati associati al percorso tra due fermate sono la distanza, il tempo di percorrenza, la pendenza media e l'indice di riempimento, ovvero il numero di passeggeri rispetto al numero dei posti effettivamente disponibili.

Per quanto riguarda i dati descrittivi dell'autobus, la procedura di calcolo ha considerato le dimensioni (Mini, Midi, Standard, Articolato), il tipo di alimentazione (Gasolio, CNG, Ibrido, Elettrico) e la classe di omologazione ambientale. Nella procedura di calcolo è stata presa in esame l'intera flotta di autobus attualmente distribuita sulle 324 linee del trasporto di superficie su gomma del Comune di Roma.

La flotta include poco più di 2000 autobus dell'ATAC e circa 440 autobus della società Roma TPL che opera su 83 linee periferiche secondo un Contratto di Servizio aggiudicato nel 2010.

La flotta "ATAC" include circa 400 autobus da 12 metri alimentati a metano, 24 dei quali con classe di omologazione ambientale EEV (veicolo ecologico avanzato) ed i restanti con classe di omologazione "EURO 3". La flotta "ATAC" comprende, inoltre, 60 bus elettrici attualmente fermi in deposito per mancanza di ricambi.

Per un confronto più immediato tra scenari è stata riproposta l'attuale struttura del servizio TPL anche nei due scenari evolutivi. La differenza principale tra i due scenari evolutivi riguarda essenzialmente la composizione della flotta di autobus.

Nel primo scenario, meno favorevole alla diffusione dell'e-mobility, si è ipotizzato un piano di rinnovo dei mezzi in grado di sostituire il 30% della flotta, composto da autobus con classe di omologazione "EURO 2" ed in parte "EURO 3", con nuovi e più ecologici autobus della classe "EURO 6". Nel secondo scenario, più ottimistico per la diffusione dell'e-mobility, si è supposto sempre un piano di rinnovo del 30% della flotta ma con nuovi autobus elettrici.

In Figura 15 è riportata la composizione della flotta operativa per classe di omologazione ambientale nella situazione attuale e nei due scenari evolutivi ipotizzati.

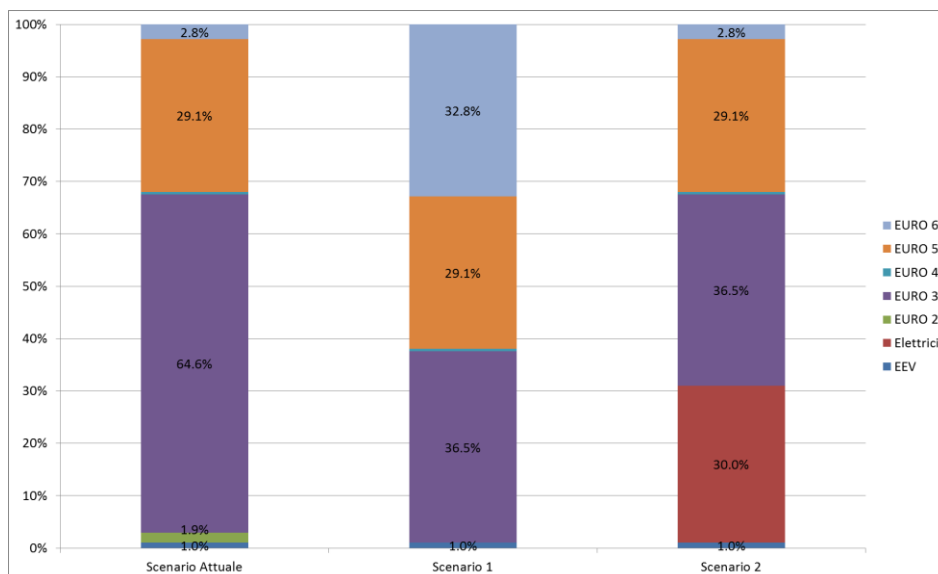


Figura 15. Composizione della flotta autobus per classe ambientale

I risultati della procedura di calcolo dei consumi e delle emissioni per le tre giornate tipo e per i tre scenari di composizione della flotta sono stati incrementati del 5% per tener conto dei percorsi effettuati dagli autobus nella fase fuori servizio, dai depositi ai capilinea e viceversa.

Le stime giornaliere delle percorrenze, e quindi dei consumi energetici e delle emissioni di inquinanti atmosferici, sono state successivamente proiettate su base annua prendendo in considerazione le festività e la riduzione delle corse solitamente attuata durante il periodo estivo.

La produzione annuale del TPL su gomma così stimata nei tre scenari ammonta a circa $132,2 \times 10^6$ bus-km. Le stime riferite alla situazione attuale mostrano un consumo annuale di gasolio e CNG pari rispettivamente a circa 37,3 ktep e 11,8 ktep.

I risultati dei calcoli eseguiti sugli scenari evolutivi evidenziano una riduzione dei consumi finali rispetto alla situazione attuale intorno al 3,4% e al 17,46% rispettivamente per lo scenario "1" e "2". Lo scenario "2" mostra, in particolare, una riduzione del consumo annuale di gasolio di circa $13,8 \times 10^3$ tep rispetto allo scenario attuale e di circa $12,1 \times 10^3$ tep rispetto allo scenario 1. Il consumo annuale di energia elettrica nello scenario 2 ammonta a poco meno di 34 GWh.

A partire dai valori di consumo energetico annuale corrispondente alla fase d'uso del combustibile (TTW) sono stati stimati i consumi annuali relativi all'intero ciclo di vita WTW (Well-To-Wheel) del vettore energetico in base ai rendimenti energetici riportati in

Tabella 8.

I risultati sui consumi energetici relativi alle fasi WTW, sempre aggregati per tipologia di alimentazione sono illustrati in Figura 16.

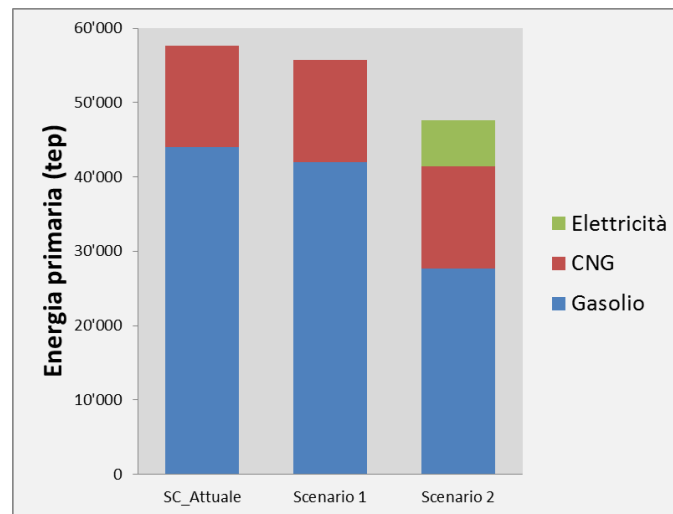


Figura 16. Consumi di energia primaria del TPL

I risultati del calcolo evidenziano una riduzione dei consumi di energia primaria rispetto allo scenario attuale di poco superiore a $2,0 \times 10^3$ tep (circa 3,5%) per lo scenario 1 e di circa $10,1 \times 10^3$ tep (intorno al 17,5%) per lo scenario "2".

Tenendo conto dei rendimenti della rete di distribuzione, delle stazioni di ricarica e delle batterie durante le fasi di carica e scarica, la produzione annua di energia elettrica necessaria per alimentare la flotta dei bus elettrici è pari a circa 40 GWh. La produzione giornaliera di energia elettrica necessaria ad alimentare la flotta di bus elettrici ammonta a circa 120 MWh nei giorni feriali e 71 MWh nei giorni festivi.

Una volta calcolate le emissioni dirette su base annua, derivanti dal combustibile consumato direttamente dalla flotta di autobus, sono state quantificate le emissioni indirette generate per la produzione e la distribuzione del combustibile fossile. Per i consumi di energia elettrica da parte dei veicoli elettrici sono state quantificate le emissioni di inquinanti prodotte dalle centrali di produzione dell'energia elettrica. Per il calcolo delle emissioni indirette sono stati utilizzati i fattori di emissione riportati nella I dati di produzione

dei carburanti necessari per la stima dei fattori di emissione in funzione della produzione sono stati presi dal Bilancio Energetico Nazionale [9].

I fattori di emissione degli inquinanti della fase PTT così stimati sono riportati in Tabella 11.

Tabella 11

La sostituzione del 30% della flotta con autobus elettrici può comportare una significativa riduzione della CO₂ equivalente (biossido di carbonio e Metano) rispetto allo scenario attuale e allo scenario “1” di circa il 23% e 20% rispettivamente.

In Figura 17 sono riportate le riduzioni percentuali delle emissioni inquinanti ottenibili nei due scenari evolutivi, di rinnovo con autobus omologati Euro 6 e con autobus Elettrici rispettivamente, rispetto allo scenario attuale.

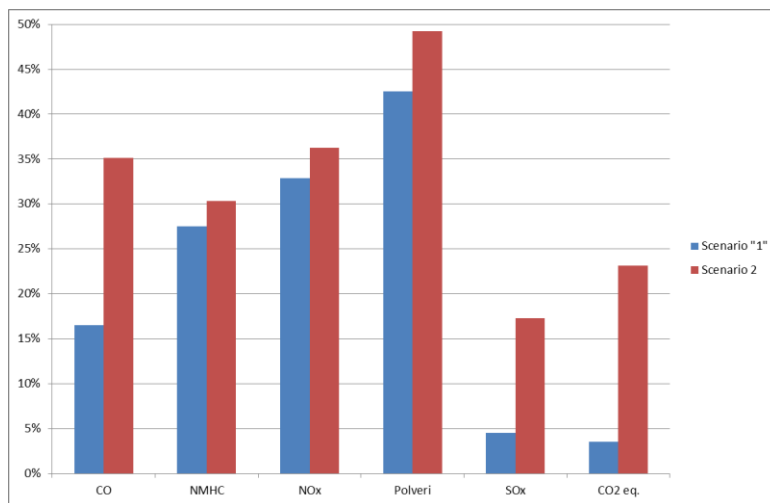


Figura 17. Riduzioni percentuali delle emissioni globali PTW per i due scenari evolutivi della flotta bus

5 Valutazione dei costi esterni

Il traffico veicolare genera una serie di esternalità, che impattano sulla collettività indistinta, senza essere contemplate nel costo sostenuto dagli utenti dei mezzi di trasporto.

L'obiettivo di questa sezione è di monetizzare le esternalità negative generate dal traffico veicolare privato e pubblico sul territorio metropolitano di Roma sia nella situazione attuale, che nei due scenari evolutivi prefigurati nelle sezioni precedenti.

Le tipologie di esternalità considerate fanno riferimento alle emissioni di sostanze nocive e/o climalteranti, nonché alle emissioni acustiche, mentre sono ritenute come invarianti, quindi non calcolate, le esternalità legate alla congestione ed alla sicurezza.

I costi esterni legati alle emissioni di inquinanti atmosferici, vengono calcolati sia con riferimento alla fase d'uso dei veicoli (esternalità dirette), o così detta fase Tank to Wheel (TTW) ossia dal serbatoio alla ruota, sia con riferimento alla fase up and down-stream (esternalità indirette) o così detta fase Well to Tank (WTT) ossia dal pozzo al serbatoio, relativa alla produzione e alla lavorazione delle fonti energetiche.

Quest'ultima fase, si scompone in due sottofasi, la prima dal pozzo alla raffinazione nota come fase Well to Processing (WTP) e la seconda che va dalla raffineria al serbatoio nota come fase Processing to Tank (PTT). In questo studio sono stimati i costi esterni generati dalla fase PTT alla fase TTW, ottenendo, nel complesso, la fase Processing to Wheel (PTW).

Attualmente, esiste una ampia varietà di metodologie che possono essere utilizzate per la stima dei costi esterni, nessuna delle quali è riconosciuta universalmente valida ed alcune sono in contraddizione con altre. Tuttavia, si rende comunque necessario poter quantificare il danno generato dalle esternalità, pertanto, si ritiene opportuno estrapolare una valutazione, seppur opinabile e con tutti i limiti del caso.

Esiste un'ampia letteratura a riguardo, da ultimo il Manuale della Commissione Europea sui costi esterni dei trasporti del 2014, che fornisce dei dati elaborati sulla base di ricerche ritenute attendibili e che vengono pertanto applicati nel presente studio.

Secondo queste più recenti stime europee¹, il valore specifico del danno prodotto dall'emissione in atmosfera di una tonnellata di inquinante generato dal trasporto terrestre, è riconducibile, per l'Italia, ai valori riportati nella seguente Tabella 12.

Tabella 12: Costi esterni unitari dei principali inquinanti del trasporto terrestre in Italia (€/tonn.)

Inquinante	Ambito	Valore_€2010/t
CO2	tutti	90
PM2.5	urbano	197.361
PM2.5	suburbano	50.121
PM2.5	rurale	24.562
NOx	tutti	10.824
VOC	tutti	1.242
SO2	tutti	9.875

Fonte: Elab. Enea su dati "Handbook of External costs of Transport", Gennaio 2014

Si osservi che per il PM, il valore del danno è diverso in funzione dell'ambito in cui si verifica l'emissione, distinguendo quest'ultimo tra urbano, suburbano e rurale. Ciò, diventa particolarmente vero per la frazione più sottile del PM (< 2,5 µm), ovvero quella più dannosa per la salute degli esseri viventi, che si concentra nel luogo di emissione senza diffondersi troppo nell'atmosfera mentre gli altri inquinanti possiedono maggiore capacità di dispersione per cui il contesto di emissione risulta meno dirimente ai fini della determinazione del danno potenzialmente prodotto.

Sono stati considerati i principali inquinanti da traffico veicolare, quali il Particolato o PM, i composti organici volatili non metallici o NMVOC e gli ossidi di Azoto (NO_x), i gas ad effetto serra, quale il metano (CH₄) quantificato in termini monetari come CO_{2eq} e l'anidride carbonica (CO₂), infine gli ossidi di zolfo (SO₂) presenti nella fase up-down stream ma irrilevanti nella fase d'uso dei veicoli. Le emissioni considerate,

¹ Update of the Handbook on External Costs of Transport, Gennaio 2014

inoltre, sono relative alla fase PTW al fine di contabilizzare i soli danni generati sul territorio nazionale, data la scarsa presenza di attività estrattive nel nostro Paese.

Per quanto riguarda le emissioni acustiche, la Tabella 13 riporta i valori di costo delle emissioni acustiche desunti dal manuale europeo per le auto e per gli autobus. Si nota che, anche in questo caso, gli impatti in ambito urbano sono decisamente più importanti rispetto a quelli rilevati nelle altre aree. Inoltre, i valori sono maggiori in caso di traffico scorrevole, in quanto, a maggiori velocità corrispondono maggiori emissioni acustiche.

Questo è particolarmente vero per il rumore generato dal motore dei veicoli a combustione interna (IC), mentre la rumorosità del motore del veicolo elettrico, è diversa a seconda del *range* di velocità raggiunto dal mezzo. Tuttavia, alle emissioni acustiche dei motori va aggiunto il rumore prodotto dal rotolamento delle ruote, il quale può ritenersi come simile tra le diverse alternative tecnologiche, dato che dipendono dal pneumatico montato.

Tabella 13. Costi specifici del rumore

Veicolo	Area	Day-dense	Day-thin	Night-thin	Night-thin
[€/1000vkm]					
AUTO	Urban	8,8	21,4	38,9	194,7
	Suburban	0,5	1,4	2,5	12,7
	Rural	0,1	0,2	0,4	1,5
BUS	Urban	44	107	80,3	194,7
	Suburban	2,4	6,8	4,5	12,7
	Rural	0,4	0,8	0,7	1,5

Fonte: Elaborazione Enea su dati "Handbook of External costs of Transport", Gennaio 2014

La rumorosità di un autobus diesel è la più alta tra le varie alternative tecnologiche considerate, infatti un Euro 0 ha un fattore emissivo superiore a 82 dB, mentre la normativa attuale limita il rumore dei veicoli più potenti a 80 dB. L'autobus a metano risulta essere più silenzioso dell'omologo diesel, riuscendo ad abbattere il rumore di 3-5 dB rispetto a quest'ultimo, ciò corrisponde ad un abbattimento pari alla metà del rumore percepito.

Per quanto riguarda il bus elettrico, si ritiene plausibile attribuire a questo un abbattimento pari ai ¾ del rumore percepito, prodotto da un veicolo a gasolio.

Si assume, quindi, che il valore specifico di costo da attribuire al rumore, in ciascuna situazione sopra descritta, per ciascuna tipologia di veicolo, si rapporti a quello dei veicoli diesel nei seguenti termini: 50% per i veicoli a metano, 25% per i veicoli elettrici e 75% per i nuovi autobus Euro 6.

Ai fini della stima del danno derivante dalle emissioni acustiche, si è proceduto all'attribuzione delle percorrenze nei vari momenti della giornata, sulla base degli orari del servizio programmato del TPL su gomma e dei viaggi realizzati dai veicoli sonda.

La fascia diurna compete dalle ore 6:00 alle ore 22:00 mentre la fascia notturna va dalle ore 22:01 alle ore 5:59. Durante la fascia diurna le ore con traffico intenso sono quelle comprese tra le ore 7:00 e le ore 19:00, come mostra la tabella di seguito. Durante le ore con traffico intenso si muove circa il 67% del traffico giornaliero, durante le ore di traffico scorrevole si muove il 20% durante le ore diurne e il rimanente 14% durante le ore notturne.

Tabella 14: Fasce orarie per intensità di traffico e per momenti della giornata [Errore. L'origine riferimento non stata trovata.](#)

Categoria di strada	Fasce orarie di intensità di traffico		Fasce orarie Diurne e notturne	
	Dense	Thin	Day	Night
Urbana	7.00-19.00	19.01 – 6.59	6.00 – 22.00	22.01 – 5.59

Nella fase d'uso, sono stimati i danni generati dalle emissioni acustiche e dagli inquinanti nocivi, assumendo che le percorrenze siano tutte espletate in ambito urbano, dove l'incidenza sia del rumore sia delle polveri sottili, è preponderante. I rispettivi valori di costo utilizzati, quindi, sono quelli proposti dal manuale europeo in ambito urbano.

Per i danni generati nella fase PTT, invece, la stima è pertinente solamente alle emissioni degli inquinanti nocivi, e non anche del rumore. In questo caso, il valore utilizzato per la stima delle polveri sottili, si assume possa essere quello indicato dal manuale europeo in ambito rurale, ipotizzando che le infrastrutture di trasporto delle fonti energetiche e i grandi impianti di raffinazione e di produzione di energia elettrica, siano ubicati lontano dai centri abitati.

La fase PTT, inoltre, è l'unica considerata per la stima dei costi esterni derivanti dalle emissioni nocive generate dai veicoli elettrici, le quali, come noto, non generano alcuna emissione in fase di uso (TTW). Una rappresentazione grafica del processo di stima dei costi esterni è riportata di seguito.

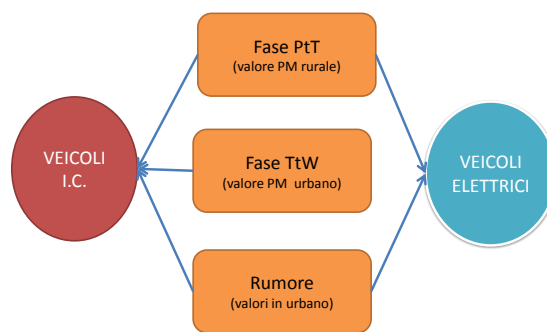


Figura 18. Processo di stima dei costi esterni

5.1 I costi esterni del TPL

A partire dagli "open data" del TPL romano, è stato possibile desumere la percorrenza annua del servizio di trasporto pubblico Capitolino. Questa sarebbe pari a 132,2 milioni di km, espletati per l'83% da autobus alimentati a gasolio e per il 17% da bus con alimentazione a metano, come mostrato nello scenario attuale della Tabella 15; nello scenario 1 sussiste la stessa suddivisione delle percorrenze tra autobus diesel e a metano in quanto viene rinnovato il 30% del parco alimento a gasolio, mentre nello scenario 2 subentra un 30% di autobus elettrici in sostituzione della quota parte degli autobus diesel, portando le percorrenze dei bus a gasolio al 53% del totale e quelle dei bus elettrici al 30%, rimangono costanti i km percorsi dei bus a metano.

Tabella 15: Percorrenze (%) nei vari scenari e per i vari tipi di bus (TPL)

Alimentazione bus	Attuale	Scenario 1	Scenario 2
		%	
Gasolio	83%	83%	53%
CNG	17%	17%	17%
Elettricità	0%	0%	30%

La stima dei costi esterni dei danni derivanti dalle **emissioni nocive**, sono riportati nella Tabella 16, che esplicita i risultati sia per la fase PTT sia per la fase TTW.

Complessivamente, l'incidenza del costo della fase PTT, rispetto alla complessiva fase PTW, è pari al 6% nello scenario attuale, al 7% nello scenario 1 e all'11% nello scenario 2 e il PM, ha un peso molto marginale, nella fase PTT, rispetto all'incidenza dello stesso nella fase TTW.

Tra i vari inquinanti nocivi, la quota di danno maggiore è imputabile all'anidride carbonica (CO₂), pari a circa la metà del costo totale in ogni scenario.

Seguono subito dopo i danni prodotti dalle emissioni di ossidi di azoto per i 2/5 del totale; le polveri sottili coprono una percentuale di circa il 10% del costo totale e valori residui sono rappresentati dal peso degli ossidi di zolfo e dei composti organici volatili.

Rispetto allo scenario attuale, già nel primo scenario prospettico (sostituzione di vetusti bus diesel con bus diesel Euro 6), il costo complessivo degli idrocarburi incombusti viene abbattuto del 28% passando da 105 mila Euro a 76 mila Euro per arrivare a 73 mila euro nello scenario 2, nel quale la percentuale di abbattimento passa al 30% rispetto allo scenario attuale.

Il costo complessivo degli NO_x viene abbattuto, del 33% nello scenario 1 e del 36% nello scenario 2.

Il valore dei danni generati dal PM si riducono del 43% nello scenario 1 e del 50% nello scenario 2, passando da un costo attuale pari a 3,5 milioni di Euro a circa 2 e 1,8 milioni di Euro nei due scenari prospettici rispettivamente.

Un consistente abbattimento dei costi contraddistingue lo scenario 2 dallo scenario 1 in particolare per il costo esterno connesso agli SO_x e alla CO_{2_eq}.

Il rapporto percentuale dei costi esterni degli scenari prospettici, rispetto a quello attuale, per i vari inquinanti sono mostrati nella Figura 19.

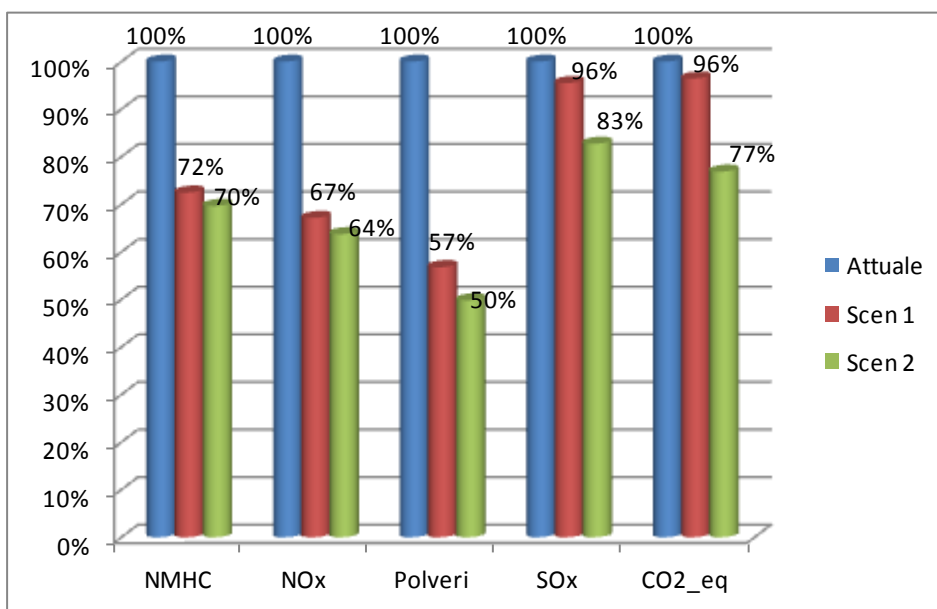


Figura 19: Rapporto dei costi esterni degli scenari prospettici rispetto allo scenario attuale per i vari emissioni nocive (TPL)

Fonte: elaborazione ENEA

Complessivamente, nello scenario attuale, i costi esterni delle emissioni nocive ammonterebbero a 31,4 milioni di euro, nello scenario 1 si ridurrebbero a 25 milioni di euro e nello scenario 2 scenderebbero fino a 21,5 milioni di euro.

Il rinnovo del parco con autobus elettrici, anziché con autobus diesel Euro 6, complessivamente genererebbe un risparmio maggiore del 14% annuo.

Tabella 16: Costi delle emissioni nocive nei vari scenari (TPL)

COSTO PTT					COSTO TTW					COSTO PTW				
Attuale	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale	Attuale	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale	Attuale	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale
<i>kEuro</i>					<i>kEuro</i>					<i>kEuro</i>				
NMHC	7	6	-	13	NMHC	55	36	-	91	NMHC	62	43	-	105
NOx	104	-	-	104	NOx	10.824	2.311	-	13.136	NOx	10.928	2.311	-	13.239
Polveri	9	-	-	9	Polveri	3.526	43	-	3.568	Polveri	3.535	43	-	3.577
SOx	195	-	-	195	SOx	-	-	-	-	SOx	195	-	-	195
CO2_eq	1.357	187	-	1.545	CO2_eq	10.278	2.515	-	12.792	CO2_eq	11.635	2.702	-	14.337
Totale	1.672	193	-	1.865	Totale	24.682	4.905	-	29.587	Totale	26.354	5.098	-	31.453
COSTO PTT					COSTO TTW					COSTO PTW				
Scenario 1	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale	Scenario 1	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale	Scenario 1	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale
<i>kEuro</i>					<i>kEuro</i>					<i>kEuro</i>				
NMHC	7	6	-	13	NMHC	26	36	-	63	NMHC	33	43	-	76
NOx	99	-	-	99	NOx	6.474	2.316	-	8.790	NOx	6.573	2.316	-	8.889
Polveri	9	-	-	9	Polveri	1.980	43	-	2.023	Polveri	1.989	43	-	2.032
SOx	186	-	-	186	SOx	-	-	-	-	SOx	186	-	-	186
CO2_eq	1.296	187	-	1.484	CO2_eq	9.827	2.518	-	12.345	CO2_eq	11.123	2.705	-	13.828
Totale	1.597	193	-	1.790	Totale	18.307	4.913	-	23.220	Totale	19.904	5.106	-	25.010
COSTO PTT					COSTO TTW					COSTO PTW				
Scenario 2	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale	Scenario 2	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale	Scenario 2	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale
<i>kEuro</i>					<i>kEuro</i>					<i>kEuro</i>				
NMHC	5	6	1	12	NMHC	25	36	-	61	NMHC	29	43	1	73
NOx	65	-	71	137	NOx	5.985	2.315	-	8.301	NOx	6.051	2.315	71	8.437
Polveri	6	-	4	9	Polveri	1.731	43	-	1.774	Polveri	1.737	43	4	1.783
SOx	123	-	38	161	SOx	-	-	-	-	SOx	123	-	38	161
CO2_eq	855	187	986	2.029	CO2_eq	6.477	2.518	-	8.995	CO2_eq	7.332	2.705	986	11.023
Totale	1.053	193	1.101	2.348	Totale	14.217	4.912	-	19.130	Totale	15.271	5.106	1.101	21.478

Fonte: elaborazione ENEA

Per la stima del danno generato dal rumore, come precedentemente detto, si è assunto che le percorrenze siano tutte espletate in ambito urbano e l'attribuzione ai vari momenti della giornata e alle varie situazioni di traffico, siano le seguenti: il 66% durante il giorno in condizioni di traffico denso (day_dense), il 20% durante il giorno con traffico scorrevole (day_thin) e il rimanente 14% durante le ore notturne, con traffico scorrevole (night_thin), come riporta la tabella di seguito.

Inoltre, le emissioni acustiche sono diverse a seconda della tipologia di alimentazione del bus, quindi, si assume che le stesse, rispetto ai modelli diesel più vetusti, siano pari al 75%, al 50% ed al 25% di quelle, se emesse rispettivamente dai nuovi autobus diesel, dai bus a metano o dai bus elettrici.

Le tabelle di seguito mostrano i risultati ottenuti in termini di costi esterni per il rumore.

Tabella 17: Ipotesi di attribuzione delle percorrenze ai vari momenti della giornata e alle varie situazioni di traffico e costo delle emissioni acustiche nello Scenario Attuale (TPL)

Scenario Attuale	Percorrenza day_dense in urbano	Percorrenza day_thin in urbano	Percorrenza night_thin in urbano	Percorrenza totale in urbano
% su totale percorrenza	66%	20%	14%	100%
km_anno_Diesel	73.112.423	21.622.144	15.119.350	109.853.916
km_anno_Metano	14.872.531	4.398.377	3.075.578	22.346.486
km_anno_Elettrico	-	-	-	-
Costi esterni Rumore				
€				
Euro_Diesel	3.216.947	2.313.569	2.943.737	8.474.253
Euro_Metano	327.196	235.313	598.815	1.161.324
Euro_Elettrico	-	-	-	-
Euro_Totale	3.544.142	2.548.883	3.542.552	9.635.577

Fonte: Elaborazione ENEA

Tabella 18: Ipotesi di attribuzione delle percorrenze ai vari momenti della giornata e alle varie situazioni di traffico e costo delle emissioni acustiche nello Scenario 1 (TPL)

Scenario 1	Percorrenza day_dense in urbano	Percorrenza day_thin in urbano	Percorrenza night_thin in urbano	Percorrenza totale in urbano
% su totale percorrenza	66%	20%	14%	100%
km_anno_Diesel	73.093.156	21.622.144	15.119.350	109.845.231
km_anno_Metano	14.891.798	4.398.377	3.075.578	22.355.171
km_anno_Elettrico	-	-	-	-
Costi esterni Rumore				
€				
Euro_Diesel	2.412.074	1.735.177	2.207.803	6.355.054
Euro_Metano	327.620	235.313	299.408	862.340
Euro_Elettrico	-	-	-	-
Euro_Totale	2.739.694	1.970.490	2.507.211	7.217.394

Fonte: Elaborazione ENEA

Tabella 19: Ipotesi di attribuzione delle percorrenze ai vari momenti della giornata e alle varie situazioni di traffico e costo delle emissioni acustiche nello Scenario 2 (TPL)

Scenario 2	Percorrenza day_dense in urbano	Percorrenza day_thin in urbano	Percorrenza night_thin in urbano	Percorrenza totale in urbano
% su totale percorrenza	66%	20%	14%	100%
km_anno_Diesel	46.520.209	13.757.808	9.620.189	69.898.206
km_anno_Metano	14.890.870	4.403.801	3.079.371	22.374.041
km_anno_Elettrico	26.573.875	7.858.913	5.495.368	39.928.156
Costi esterni Rumore				
€				
Euro_Diesel	2.046.889	1.472.085	1.873.051	5.392.025
Euro_Metano	327.599	235.603	299.777	862.979
Euro_Elettrico	292.313	210.226	267.487	770.026
Euro_Totale	2.666.801	1.917.915	2.440.315	7.025.030

Fonte: Elaborazione ENEA

I costi esterni generati dal rumore sarebbero pari a 9,6 milioni di euro nello scenario attuale, dovuti per l'88% agli autobus diesel e per il rimanente 12% ai bus a metano. Il costo complessivo si ridurrebbe del 25% nello scenario 1 e di un ulteriore 2,7% nello scenario 2.

In ultima analisi, attualmente, il totale dei costi generati dalle emissioni nocive e dal rumore, stimati per il servizio di TPL nella Capitale, ammonterebbe a 41 milioni di euro l'anno; la sostituzione del 30% di bus vetusti con nuovi bus Euro 6, consentirebbe di risparmiare annualmente 8,9 milioni di euro, pari al 22%; nello Scenario 2, l'avvento del 30% di nuovi bus elettrici, ridurrebbe l'ammontare dei costi esterni di 12,6 milioni di euro l'anno pari al 31% in meno rispetto allo scenario attuale. In tutti e tre gli scenari, circa i ¼ dei costi sono dovuti agli emissioni nocive immesse in atmosfera e circa 1/3 è dovuto alle emissioni acustiche. La tabella di seguito riporta in dettaglio i costi esterni degli inquinanti e del rumore nei vari scenari e per le diverse alimentazioni di bus, tali dati vengono poi illustrati graficamente con la figura successiva.

Tabella 20: Costi esterni totali degli emissioni nocive e del rumore per tipologia di bus nei vari scenari (TPL)

Attuale				
	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale
Euro				
Emissioni nocive	26.354.324	5.098.359	-	31.452.683
Rumore	8.474.253	1.161.324	-	9.635.577
TOTALE	34.828.577	6.259.683	-	41.088.260
Scenario 1				
	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale
Emissioni nocive	19.903.881	5.106.273	-	25.010.154
Rumore	6.355.054	862.340	-	7.217.394
TOTALE	26.258.935	5.968.613	-	32.227.548
Scenario 2				
	Gasolio	CNG	Elettricità	Totale
Emissioni nocive	15.270.709	5.105.947	1.100.955	21.477.611
Rumore	5.392.025	862.979	770.026	7.025.030
TOTALE	20.662.734	5.968.927	1.870.980	28.502.641

Fonte: Elaborazione ENEA

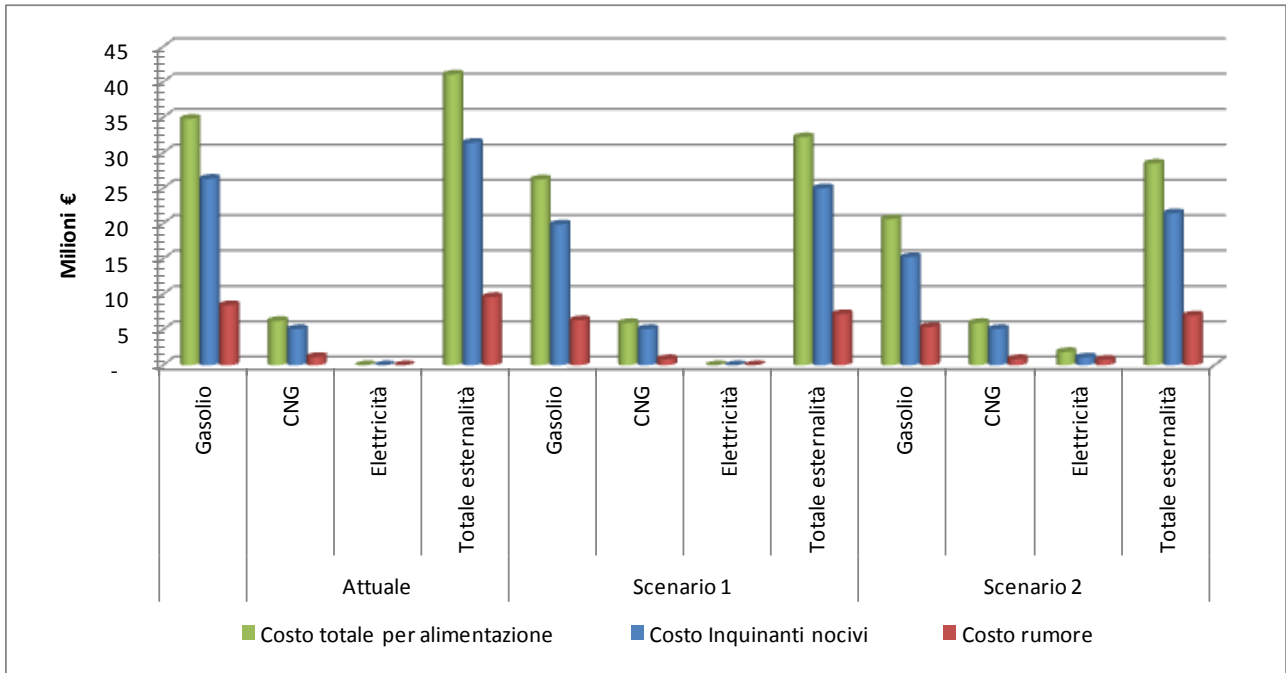


Figura 20: Costi esterni totali degli inquinanti e del rumore per tipologia di bus nei vari scenari (TPL)

Fonte: Elaborazione ENEA

5.2 I costi esterni per il settore auto private

Per la stima delle esternalità prodotte nella Capitale dal parco auto privato, sono state considerate sei tipologie di alimentazione: benzina, diesel, GPL, metano, ibrida ed elettrica e due scenari prospettici al 2025, oltre a quello di riferimento, nei quali si ipotizza un tasso di rinnovo annuo del parco, pari al 5%, di cui il 3% siano nuove auto ibride. Nel primo scenario evolutivo si assume che tale sostituzione interessi nuovi mezzi omologati EURO 6. Nel secondo scenario prospettico, si assume invece, che la sostituzione delle auto più datate coinvolga nuovi veicoli elettrici. Alla fine del periodo di osservazione, le auto elettriche, avranno raggiunto una quota di mercato pari al 10%.

La percorrenza annua del parco auto privato nella Capitale è stimata in 20,7 miliardi di km, espletati attualmente per la metà da auto a benzina e per il 44% dalle auto a gasolio, le auto a GPL coprono il 6% delle percorrenze e il rimanente 1% spetta alle auto a metano. La situazione si evolve a favore delle tecnologie meno impattanti, senza invertire gli ordini di grandezza, sia nel primo che nel secondo scenario, in quest'ultimo la quota della auto elettriche arriva al 10% del totale.

Le percorrenze saranno utilizzate per la stima dei danni generati dalle emissioni acustiche per le varie tipologie veicolari, applicando un costo specifico espresso in €/v-km, mentre per poter stimare il danno prodotto dalle emissioni degli inquinanti atmosferici e dei gas serra, sono state considerate le tonnellate delle relative emissioni al fine di poterle raffrontare con i valori di costo unitari a disposizione, espressi per l'appunto in termini di €/tonnellata.

Nella Tabella 21 e nella Tabella 22 sono riportati i dati, rispettivamente, delle percorrenze e delle tonnellate per inquinante emesse, per tipologia di alimentazione e per ciascuno scenario. Negli scenari prospettici, la diversa composizione del parco in circolazione determinerebbe una forte riduzione delle emissioni degli NOx, in particolare di quello prodotto dalle auto a benzina. Molte tonnellate sarebbero risparmiate anche nel caso delle polveri, grazie soprattutto alla riduzione delle auto diesel, e dei composti organici volatili legato in particolare alla circolazione di un minor numero di auto a benzina, più contenuti i risultati in termini di ossidi di zolfo e di gas ad effetto serra. In quest'ultimo caso, le tonnellate di emissioni sono di parecchi ordini di grandezza maggiori rispetto agli altri inquinanti e quindi anche se in termini relativi l'abbattimento delle tonnellate di CO₂ è modesta, in valori assoluti potrebbero essere evitate, rispetto alla situazione attuale, 309 mila tonnellate nel primo scenario e 594 mila tonnellate nel secondo.

Tabella 21: Percorrenze (%) nei vari scenari e per i vari tipi di alimentazione delle auto (parco auto privato)

Alimentazione	Attuale	Scenario 1	Scenario 2
bus			
	%		
Benzina	50%	49%	43%
Gasolio	44%	42%	38%
GPL	6%	6%	6%
CNG	1%	1%	1%
Ibridi	0%	2%	2%
Elettricità	0%	0%	10%

Fonte: Elaborazione ENEA su dati

Tabella 22: Tonnellate emissioni nocive – parco auto privato

ATTUALE							
Tonnellate							Totale
	Benzina	Gasolio	GPL	CNG	Ibridi	Elettricità	
NMHC	3.251	339	189	8	2	-	3.787
NOx	9.968	6.912	874	4	2	-	17.760
Polveri	25	383	2	0	0	-	411
SOx	369	280	18	-	1	-	668

CO2_eq	2.350.966	1.837.206	209.441	17.118	9.322	-	4.424.053
--------	-----------	-----------	---------	--------	-------	---	-----------

Scenario 1							
Tonnellate							
	Benzina	Gasolio	GPL	CNG	Ibridi	Elettricità	Totale
NMHC	713	320	32	15	9	-	1.090
NOx	4.650	4.541	362	8	8	-	9.569
Polveri	22	144	2	0	1	-	169
SOx	326	259	18	-	8	-	611
CO2_eq	2.106.943	1.705.624	214.158	37.638	50.408	-	4.114.771

Scenario 2							
Tonnellate							
	Benzina	Gasolio	GPL	CNG	Ibridi	Elettricità	Totale
NMHC	655	279	30	15	8	10	997
NOx	4.494	4.318	364	8	8	72	9.263
Polveri	19	141	2	0	1	2	165
SOx	287	236	18	-	7	43	591
CO2_eq	1.859.337	1.551.386	213.401	38.131	47.176	120.109	3.829.540

Nella situazione attuale, il 58% dei costi delle esternalità è imputabile all'emissione di gas ad effetto serra il 28% alle emissioni di ossidi di azoto (NOx) e il 12% alle polveri, in maniera residuale incidono i composti volatili e gli ossidi di zolfo. Negli scenari prospettici, è possibile apprezzare l'effetto positivo che deriva dalla riduzione delle auto a benzina e diesel in circolazione. Ciò si traduce, infatti, in un importante abbattimento dei danni prodotti dagli inquinanti, in particolare dalle polveri e dagli NOx. Lo stesso effetto non si ripete per i danni prodotti dalle emissioni di CO₂, che si riducono, ma in maniera molto più contenuta in termini relativi. (Figura 21).

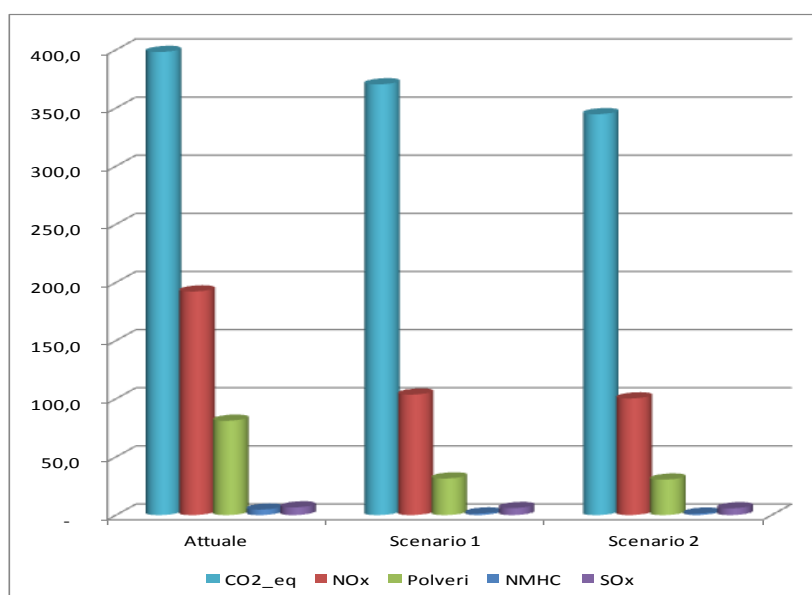


Figura 21: Costo degli emissioni nocive in atmosfera nei vari scenari [milioni di €] (parco auto privato)

Esaminando i danni delle esternalità per tipologia di alimentazione veicolare, queste sono quasi totalmente imputabili alle auto a benzina e alle auto diesel, mentre una quota residuale è rappresentata dalle auto a GPL.

Nell'ultimo scenario, i costi esterni da emissioni nocive in atmosfera, sono imputabili per il 3% alle auto elettriche (Figura 22). Il rapporto percentuale dei costi esterni degli scenari prospettici, rispetto a quello attuale, per i vari inquinanti sono mostrati nella Figura 23.

I costi esterni dei danni derivanti dalle emissioni degli emissioni nocive, sono riportati nella Tabella 23, che esplicita i risultati sia per la fase PTT sia per la fase TTW. Anche nel caso delle auto, la fase precedente all'uso ha un peso poco rilevante in tutti e tre gli scenari.

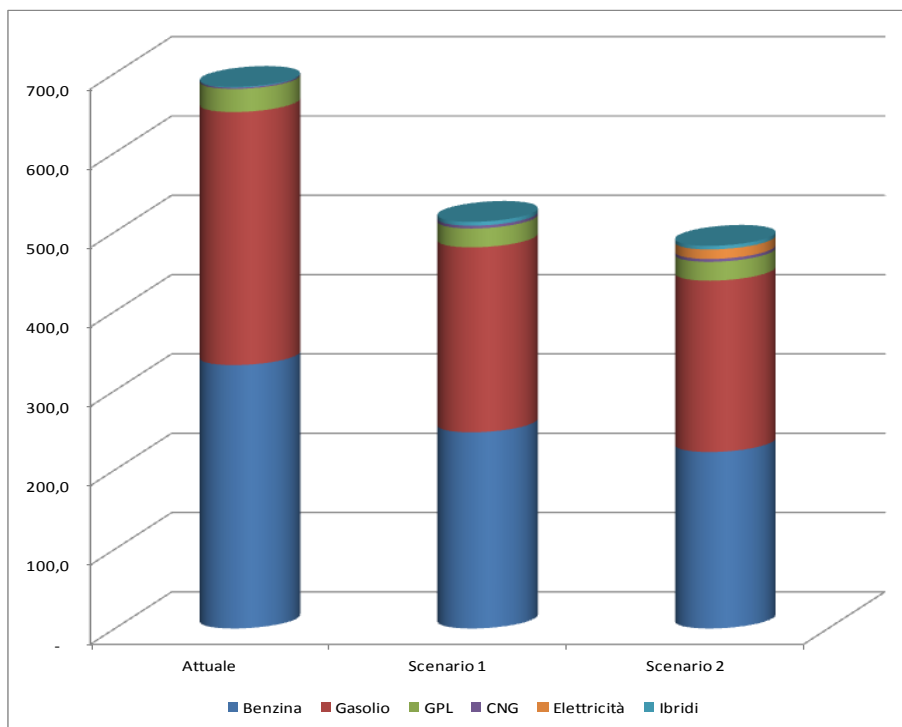


Figura 22: Quote di costo esterno degli emissioni nocive attribuibile alle diverse alimentazioni di auto nei vari scenari (parco auto privato)

Fonte: elaborazione ENEA

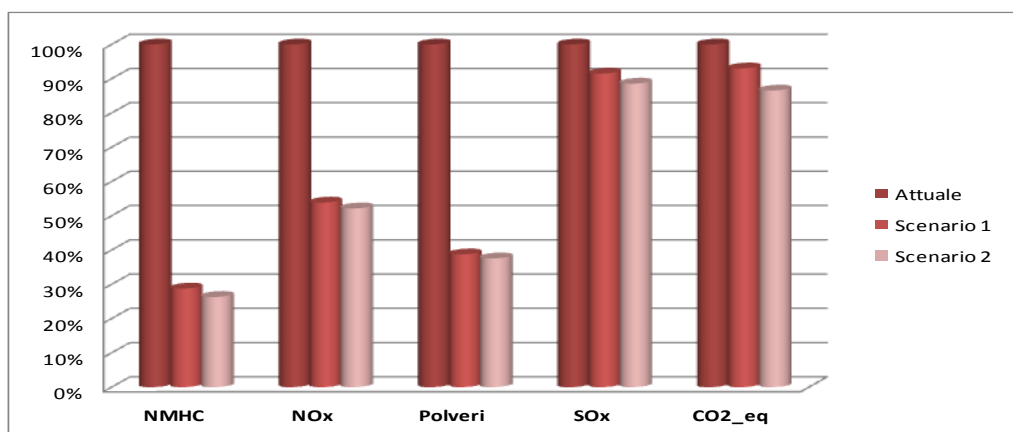


Figura 23: Confronto della quota dei costi esterni degli scenari prospettici rispetto allo scenario attuale per i vari emissioni nocive (parco auto privato)

Fonte: elaborazione ENEA

Tabella 23: Costo emissioni nocive - Parco auto privato

	Attuale - PTT							Attuale - TTW							Attuale - PTW						
	Benzina	Gasolio	GPL	CNG	Ibridi	Elettricità	Totale	Benzina	Gasolio	GPL	CNG	Ibridi	Elettricità	Totale	Benzina	Gasolio	GPL	CNG	Ibridi	Elettricità	Totale
	Mln Euro							Mln Euro							Mln Euro						
NMHC	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	-	0,6	3,5	0,3	0,2	0,0	0,0	-	4,1	4,0	0,4	0,2	0,0	0,0	-	4,7
NOx	1,9	1,5	0,1	-	0,0	-	3,5	106,0	73,4	9,4	0,0	0,0	-	188,7	107,9	74,8	9,5	0,0	0,0	-	192,2
Polveri	1,4	1,0	0,1	-	0,0	-	2,5	3,6	74,6	0,4	0,0	0,0	-	78,6	5,0	75,7	0,4	0,0	0,0	-	81,1
SOx	3,6	2,8	0,2	-	0,0	-	6,6	-	-	-	-	-	-	-	3,6	2,8	0,2	-	0,0	-	6,6
CO2eq	25,4	19,2	1,2	0,1	0,1	-	46,1	186,2	146,1	17,6	1,4	0,7	-	352,1	211,6	165,3	18,8	1,5	0,8	-	398,2
Totale	32,8	24,6	1,6	0,1	0,1	-	59,3	299,3	294,4	27,6	1,5	0,8	-	623,5	332,1	319,0	29,2	1,6	0,9	-	682,8
	Scenario 1 - PTT							Scenario 1 - TTW							Scenario 1 - PTW						
	Mln Euro							Mln Euro							Mln Euro						
NMHC	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	-	0,6	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	-	0,8	0,9	0,4	0,0	0,0	0,0	-	1,4
NOx	1,7	1,4	0,1	-	0,0	-	3,2	48,6	47,8	3,8	0,1	0,0	-	100,4	50,3	49,2	3,9	0,1	0,1	-	103,6
Polveri	0,2	0,1	0,0	-	0,0	-	0,3	3,2	27,4	0,4	0,1	0,1	-	31,2	3,3	27,5	0,4	0,1	0,1	-	31,4
SOx	3,2	2,6	0,2	-	0,1	-	6,0	-	-	-	-	-	-	-	3,2	2,6	0,2	-	0,1	-	6,0
CO2eq	22,4	17,9	1,3	0,2	0,5	-	42,3	167,2	135,7	18,0	3,2	4,0	-	328,0	189,6	153,5	19,3	3,4	4,5	-	370,3
Totale	27,9	22,0	1,5	0,2	0,7	-	52,4	219,5	211,2	22,2	3,3	4,2	-	460,4	247,4	233,2	23,8	3,6	4,9	-	512,7
	Scenario 2 - PTT							Scenario 2 - TTW							Scenario 2 - PTW						
	Mln Euro							Mln Euro							Mln Euro						
NMHC	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,4	0,3	0,0	0,0	0,0	-	0,7	0,8	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2
NOx	1,5	1,2	0,1	-	0,0	0,8	3,7	47,1	45,5	3,8	0,1	0,0	-	96,6	48,6	46,7	3,9	0,1	0,1	0,8	100,3
Polveri	0,1	0,1	0,0	-	0,0	0,0	0,3	2,8	26,9	0,4	0,1	0,1	-	30,2	2,9	27,0	0,4	0,1	0,1	0,0	30,5
SOx	2,8	2,3	0,2	-	0,1	0,4	5,8	-	-	-	-	-	-	-	2,8	2,3	0,2	-	0,1	0,4	5,8
CO2eq	19,8	16,2	1,3	0,2	0,5	10,8	48,8	147,6	123,4	18,0	3,2	3,7	-	295,8	167,3	139,6	19,2	3,4	4,2	10,8	344,7
Totale	24,7	20,0	1,5	0,2	0,6	12,1	59,1	197,9	196,0	22,2	3,4	3,9	-	423,4	222,5	216,0	23,7	3,6	4,5	12,1	482,5

Fonte: Elaborazione ENEA

Il totale dei costi esterni derivanti attualmente dalle emissioni nocive generate dalla circolazione del parco auto privato nella Capitale, applicando i valori di costo del manuale europeo, sarebbero stimati in 683 milioni di euro all'anno.

A proposito dei valori applicabili, tuttavia, bisogna rimarcare il loro carattere incerto e sindacabile, di cui un esempio ne può essere il prezzo attribuito alla CO₂ nel mercato dell'*Emission Trading* pari a 20 €/t, notevolmente inferiore rispetto a quello utilizzato in questo lavoro.

Il contenimento dei danni esterni nei due scenari prospettici, dovuto all'abbattimento delle emissioni nocive, sarebbe pari al 25% nello scenario 1 e del 29,3% nello scenario 2, pari ad un risparmio annuo rispettivamente di 170 milioni di euro e di 200 milioni di euro.

Per la stima del danno generato dalle **emissioni acustiche**, come sopra detto, si è assunto che le percorrenze siano tutte espletate in ambito urbano e l'attribuzione ai vari momenti della giornata e alle varie situazioni di traffico, siano le seguenti: il 66% durante il giorno in condizioni di traffico denso (day_dense), il 20% durante il giorno con traffico scorrevole (day_thin) e il rimanente 14% durante le ore notturne, con traffico scorrevole (night_thin), come riporta la tabella di seguito. Inoltre, le emissioni acustiche sono diverse a seconda della tipologia di alimentazione del veicolo, quindi, si assume che le stesse, rispetto alle auto a benzina e diesel rappresentino una quota di rumore percepito pari al 50% per le auto a gas ed al 25% per le elettriche e ibride. Le tabelle di seguito mostrano i risultati ottenuti in termini di costi esterni per il rumore.

Tabella 24: Ipotesi di attribuzione delle percorrenze ai vari momenti della giornata e alle varie situazioni di traffico e costo delle emissioni acustiche nello Scenario Attuale (parco auto privato)

Scenario Attuale	Percorrenza day_dense in urbano	Percorrenza day_thin in urbano	Percorrenza night_thin in urbano	Percorrenza totale in urbano
% su totale percorrenza	66%	20%	14%	100%
km_anno_Benzina	6.887.145.737	2.036.792.800	1.424.233.522	10.348.172.059
km_anno_Diesel	5.993.816.905	1.772.601.246	1.239.496.779	9.005.914.931
km_anno_GPL	768.007.346	227.129.190	158.820.773	1.153.957.309
km_anno_Metano	72.873.979	21.551.627	15.070.040	109.495.646
km_anno_Ibride	49.336.054	14.590.561	10.202.494	74.129.109
km_anno_Elettrico	-	-	-	-
Costi esterni Rumore				
	€			
Euro_Benzina	60.606.882	43.587.366	55.402.684	159.596.932
Euro_Diesel	52.745.589	37.933.667	48.216.425	138.895.680
Euro_GPL	3.379.232	2.430.282	3.089.064	8.898.579
Euro_Metano	320.646	230.602	293.112	844.360
Euro_Ibrida	108.539	78.060	99.219	285.818
Euro_Elettrico	-	-	-	-
Euro_Totale	117.160.888	84.259.977	107.100.504	308.521.370

Fonte: Elaborazione ENEA

Tabella 25: Ipotesi di attribuzione delle percorrenze ai vari momenti della giornata e alle varie situazioni di traffico e costo delle emissioni acustiche nello Scenario 1 (parco auto privato)

Scenario 1	Percorrenza day_dense in urbano	Percorrenza day_thin in urbano	Percorrenza night_thin in urbano	Percorrenza totale in urbano
% su totale percorrenza	66%	20%	14%	100%
km_anno_Benzina	6.755.395.452	1.997.829.194	1.396.988.103	10.150.212.749
km_anno_Diesel	5.805.494.221	1.716.907.015	1.200.552.420	8.722.953.656
km_anno_GPL	778.711.476	230.294.811	161.034.343	1.170.040.630
km_anno_Metano	163.962.952	48.490.125	33.906.867	246.359.944
km_anno_Ibride	267.615.921	79.144.279	55.341.876	402.102.075
km_anno_Elettrico	-	-	-	-
Costi esterni Rumore				
€				
Euro_Benzina	59.447.480	42.753.545	54.342.837	156.543.862
Euro_Diesel	51.088.349	36.741.810	46.701.489	134.531.648
Euro_GPL	3.426.330	2.464.154	3.132.118	9.022.603
Euro_Metano	721.437	518.844	659.489	1.899.770
Euro_Ibrida	588.755	423.422	538.200	1.550.377
Euro_Elettrico	-	-	-	-
Euro_Totale	115.272.352	82.901.776	105.374.133	303.548.260

Fonte: Elaborazione ENEA

Tabella 26: Ipotesi di attribuzione delle percorrenze ai vari momenti della giornata e alle varie situazioni di traffico e costo delle emissioni acustiche nello Scenario 2 (parco auto privato)

Scenario 2	Percorrenza day_dense in urbano	Percorrenza day_thin in urbano	Percorrenza night_thin in urbano	Percorrenza totale in urbano
% su totale percorrenza	66%	20%	14%	100%
km_anno_Benzina	5.954.090.828	1.760.852.724	1.231.281.590	8.946.225.142
km_anno_Diesel	5.258.831.103	1.555.237.792	1.087.504.727	7.901.573.622
km_anno_GPL	775.179.869	229.250.380	160.304.021	1.164.734.270
km_anno_Metano	166.006.717	49.094.545	34.329.509	249.430.772
km_anno_Ibride	250.323.203	74.030.160	51.765.813	376.119.176
km_anno_Elettrico	1.366.748.301	404.199.825	282.637.949	2.053.586.074
Costi esterni Rumore				
€				
Euro_Benzina	52.395.999	37.682.248	47.896.854	137.975.101
Euro_Diesel	46.277.714	33.282.089	42.303.934	121.863.736
Euro_GPL	3.410.791	2.452.979	3.117.913	8.981.684
Euro_Metano	730.430	525.312	667.709	1.923.450
Euro_Ibrida	550.711	396.061	503.423	1.450.195
Euro_Elettrico	3.006.846	2.162.469	2.748.654	7.917.969
Euro_Totale	106.372.491	76.501.158	97.238.486	280.112.136

Fonte: Elaborazione ENEA

I costi esterni generati dal rumore sarebbero pari a 308,5 milioni di euro nello scenario attuale e scenderebbero a 303,5 milioni di euro nel primo scenario prospettico ed a 280 milioni di euro nel secondo,

con una riduzione del 2% nel primo caso e del 9% nel secondo. La composizione percentuale dei costi del rumore per tipo di veicolo conferma che la maggior parte della quota di costo è imputabile alle auto a benzina (52-49) e diesel (45-44%) e una quota residuale non rilevante, alle restanti tipologie di auto.

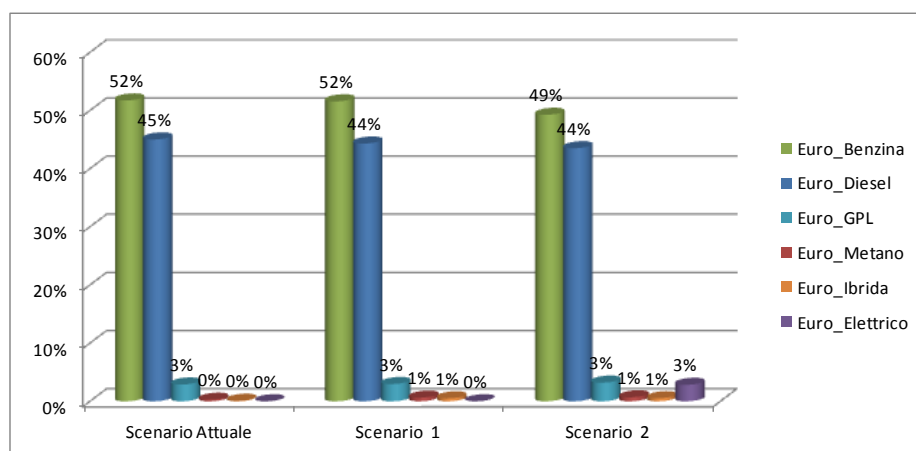


Figura 24: Costi esterni del rumore generato dalle diverse alimentazioni nei vari scenari (parco auto privato)

Fonte: Elaborazione ENEA

In ultima analisi, complessivamente, il totale dei costi generati dalle esternalità stimate per il trasporto privato nella Capitale, ammonterebbe a 991 milioni di euro l'anno nello scenario attuale. La sostituzione graduale del parco con veicoli nuovi Euro 6 e ibridi, consentirebbe di risparmiare annualmente 175 milioni, pari ad una riduzione del 18%. Nello Scenario 2, l'avvento delle auto elettriche e ibride, consentirebbe di ridurre l'ammontare dei costi esterni di 229 milioni di euro l'anno, pari ad una diminuzione del 23% rispetto allo scenario attuale. Nella situazione attuale, il 70% del costo totale è generato dalle emissioni nocive e il 30% dal rumore, invece, negli scenari prospettici si riduce la quota delle emissioni nocive per effetto di un maggior ricorso ai veicoli meno impattanti, aumentando conseguentemente la quota imputabile al rumore. La tabella di seguito riporta in dettaglio i costi esterni delle emissioni nocive e del rumore nei vari scenari e per le diverse alimentazioni di bus, tali dati vengono poi illustrati graficamente con la figura successiva.

Tabella 27: Costi esterni delle emissioni nocive e del rumore per tipologia veicolare nei vari scenari (parco auto privato)

Attuale							
	Benzina	Gasolio	gpl	CNG	ibrida	Elettricità	Totale
	Euro						
Emissioni nocive	332.111.128	319.025.338	29.162.429	1.625.372	901.655	-	682.825.922
Rumore	159.596.932	138.895.680	8.898.579	844.360	285.818	-	308.521.370
TOTALE	491.708.061	457.921.018	38.061.007	2.469.732	1.187.473	-	991.347.291

Scenario 1							
	Benzina	Gasolio	gpl	CNG	ibrida	Elettricità	Totale
Emissioni nocive	247.387.331	233.155.240	23.778.096	3.568.186	4.850.378	-	512.739.231
Rumore	156.543.862	134.531.648	9.022.603	1.899.770	1.550.377	-	303.548.260
TOTALE	403.931.193	367.686.889	32.800.699	5.467.956	6.400.755	-	816.287.491

Scenario 2

	Benzina	Gasolio	gpl	CNG	ibrida	Elettricità	Totale
Emissioni nocive	222.537.144	216.023.908	23.723.748	3.613.930	4.539.322	12.065.952	482.504.003
Rumore	137.975.101	121.863.736	8.981.684	1.923.450	1.450.195	7.917.969	280.112.136
TOTALE	360.512.246	337.887.644	32.705.432	5.537.380	5.989.517	19.983.922	762.616.139

Fonte: Elaborazione ENEA

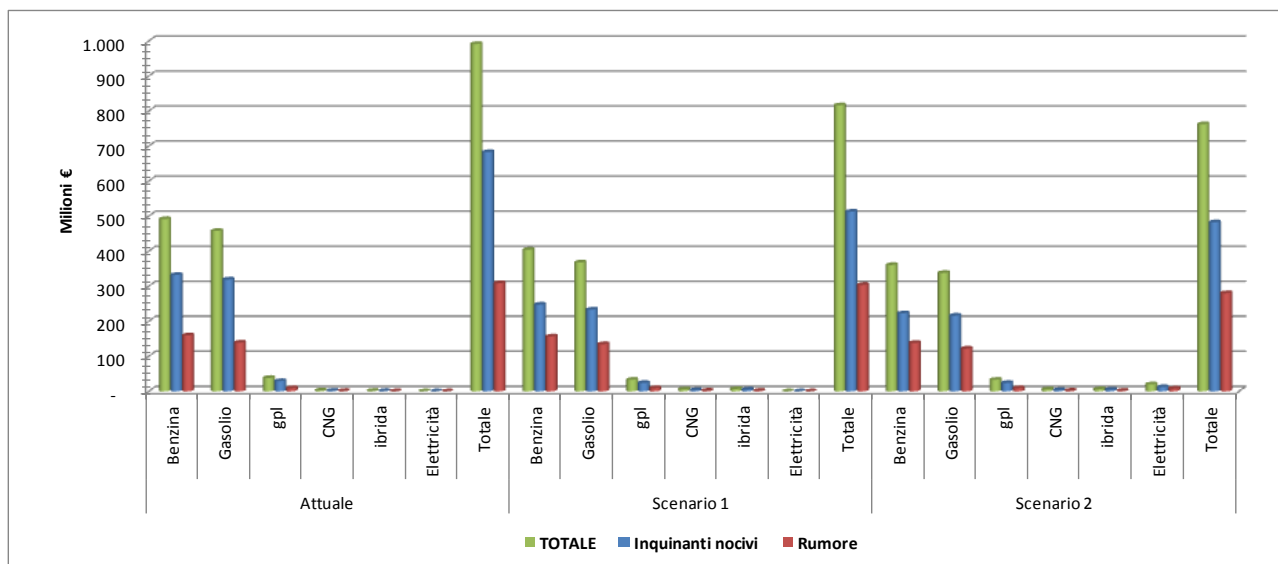


Figura 25: Costi esterni totali degli inquinanti e del rumore per tipologia di alimentazione auto nei vari scenari (parco auto privato)

Fonte: Elaborazione ENEA

5.3 I costi esterni generati dal trasporto pubblico e privato nella Città di Roma

Il risultato dell'analisi condotta sull'ammontare dei danni derivanti dalle esternalità considerate in questo lavoro nella sola Città di Roma Capitale, non lascia dubbi circa il peso che hanno gli impatti della mobilità privata in termini di inquinamento atmosferico e acustico e di riscaldamento globale. Il dato complessivo che è stato stimato, infatti, conferma che solo una quota residuale e pari al 4% del totale del valore degli impatti, sarebbe attribuibile al trasporto pubblico locale (su gomma) mentre il restante 96% sarebbe generato dalla mobilità privata.

Le percorrenze chilometriche annue complessive sono riportate nella tabella di seguito. Dei 20,8 miliardi di km percorsi nella Capitale ogni anno, meno dell'1% pari a 132 milioni di km vengono eserciti dal TPL.

Tabella 28: Percorrenze annuali totali

km_anno TOTALI	Attuale	Scenario 1	Scenario 2
Benzina	10.348.172.059	9.766.520.934	8.709.996.366
Gasolio	9.115.768.847	8.521.954.524	7.783.016.112
GPL	1.153.957.309	1.884.369.430	1.582.839.521
CNG	131.842.132	275.611.055	237.765.459
Ibridi	74.129.109	375.413.515	392.032.377
Elettricità	-	-	2.118.219.622
Totale	20.823.869.457	20.823.869.457	20.823.869.457

Fonte: Elaborazione ENEA

Complessivamente, ad oggi nella Capitale, il trasporto privato creerebbe esternalità per un valore di 991 milioni di euro l'anno a fronte di 41 milioni di euro l'anno derivanti dal TPL, per un totale di 1.032 milioni di euro.

Per questi, sarebbero responsabili le emissioni nocive per oltre i 2/3 e il rumore per 1/3, le auto a benzina e i veicoli diesel insieme coprirebbero oltre il 95% dei costi totali delle esternalità stimate.

La sostituzione del parco attuale con nuovi veicoli Euro 6 e ibridi nel caso delle auto, consentirebbe già un cospicuo risparmio, del 18% pari a 184 milioni di euro l'anno, quasi tutto imputabile all'abbattimento degli impatti negativi delle emissioni nocive, non riuscendo, le auto euro 6, ad ottenere risultati significativi in termini di riduzione del rumore, rispetto alle tecnologie già presenti in circolazione.

La situazione potrà, tuttavia, essere diversa per la sostituzione degli autobus più vetusti, in quanto la normativa impone una riduzione del limite massimo delle emissioni acustiche per i nuovi veicoli di maggiore potenza.

La penetrazione dei veicoli elettrici, prevista nel secondo scenario prospettico sia per il privato sia per il TPL, ridurrebbe i danni delle esternalità complessive per 241 milioni di euro all'anno, pari ad un risparmio del 23% rispetto alla situazione attuale. L'ammontare delle esternalità prodotte sarebbe imputabile per il 64% alle emissioni nocive e per il 36% al rumore.

Nella Tabella 29 si riassumono i costi complessivi per i tre scenari e la Figura 26 di seguito mostra la quota di ciascuna esternalità per ciascun scenario.

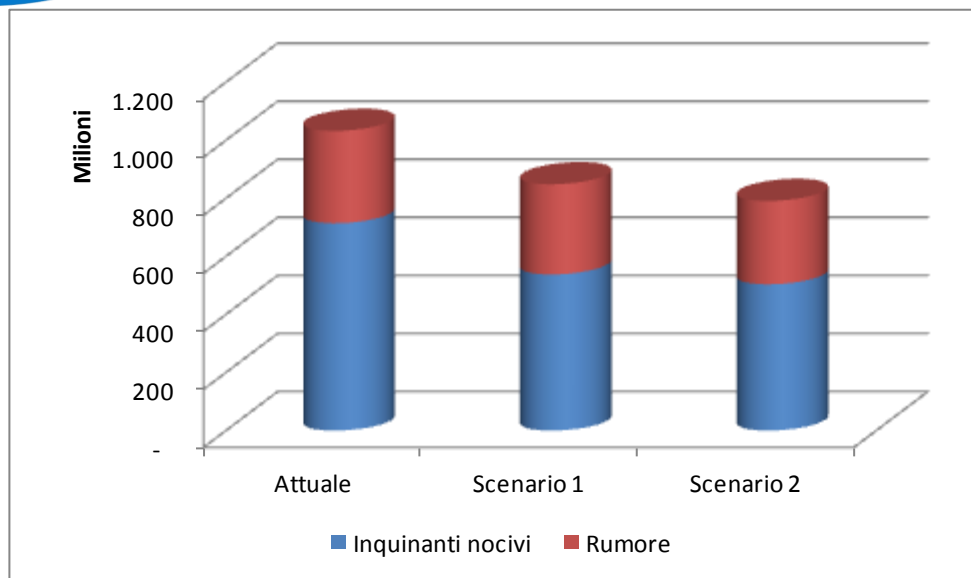


Figura 26: Costi esterni totali per emissioni nocive e per emissioni acustiche

Tabella 29: Costi esterni totali degli inquinanti e del rumore per tipologia di bus nei vari scenari (parco auto privato e TPL)

Attuale							
PTW	Benzina	Gasolio	gpl	CNG	ibrida	Elettricità	Totale
Euro							
Emissioni nocive	332.111.128	345.379.661	29.162.429	6.723.731	901.655	-	714.278.605
Rumore	159.596.932	147.369.934	8.898.579	2.005.684	285.818	-	318.156.947
TOTALE	491.708.061	492.749.595	38.061.007	8.729.416	1.187.473	-	1.032.435.552

Scenario 1							
PTW	Benzina	Gasolio	gpl	CNG	ibrida	Elettricità	Totale
Euro							
Emissioni nocive	247.387.331	253.059.122	23.778.096	8.674.458	4.850.378	-	537.749.385
Rumore	156.543.862	140.886.703	9.022.603	2.762.110	1.550.377	-	310.765.654
TOTALE	403.931.193	393.945.824	32.800.699	11.436.569	6.400.755	-	848.515.039

Scenario 2							
PTW	Benzina	Gasolio	gpl	CNG	ibrida	Elettricità	Totale
Euro							
Emissioni nocive	222.537.144	231.294.616	23.723.748	8.719.877	4.539.322	13.166.907	503.981.614
Rumore	137.975.101	127.255.762	8.981.684	2.786.429	1.450.195	8.687.995	287.137.166
TOTALE	360.512.246	358.550.378	32.705.432	11.506.306	5.989.517	21.854.902	791.118.780

Fonte: Elaborazione ENEA

Figura 27 e Figura 28 di seguito mostrano l'ammontare dei danni generati da ciascun inquinante atmosferico, dal gas serra e dalle emissioni acustiche per vettore energetico e per ciascuno scenario; la Figura 29 illustra le rispettive quote per le emissioni nocive.

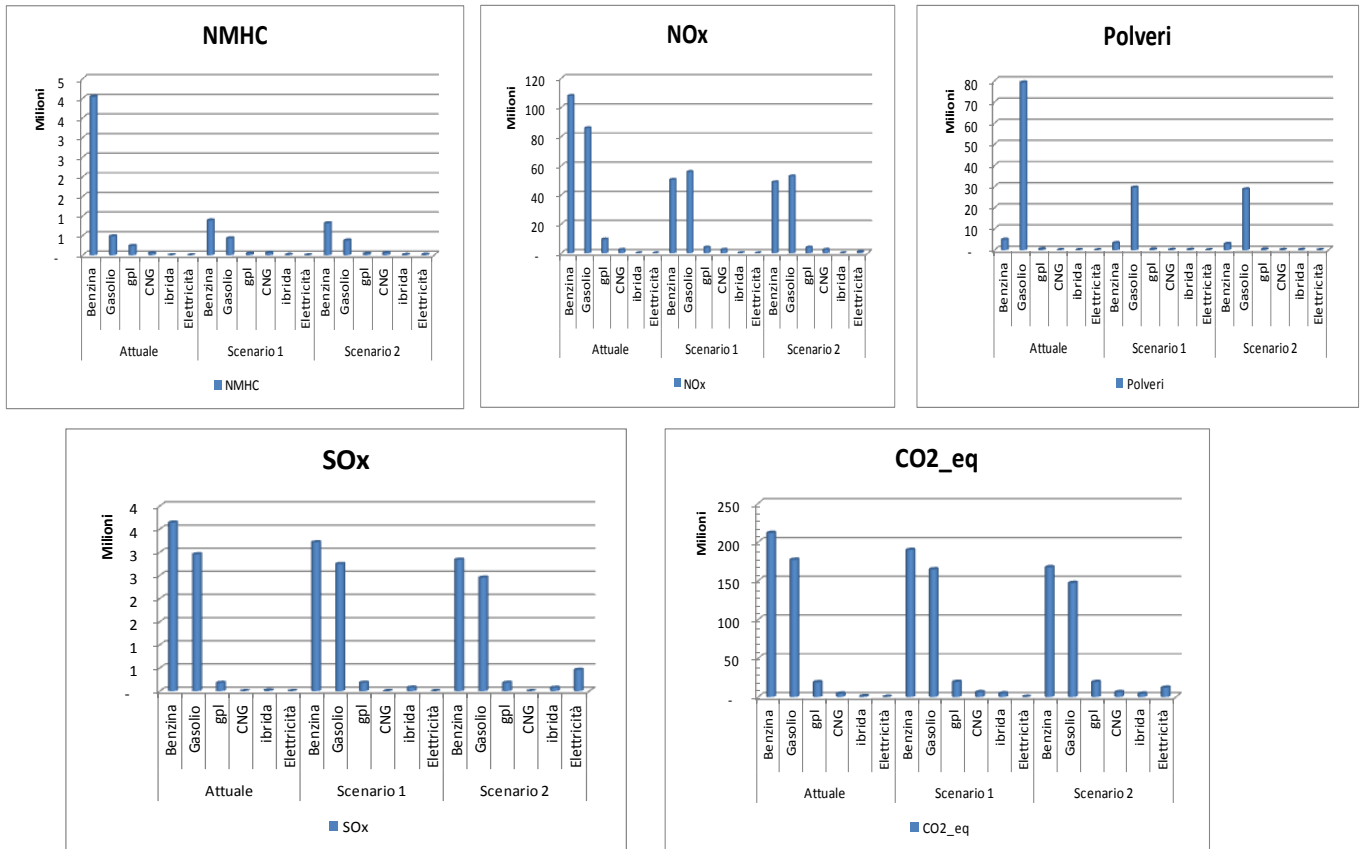


Figura 27: Costo di inquinante nocivo per alimentazione (%)

Fonte: Elaborazione ENEA

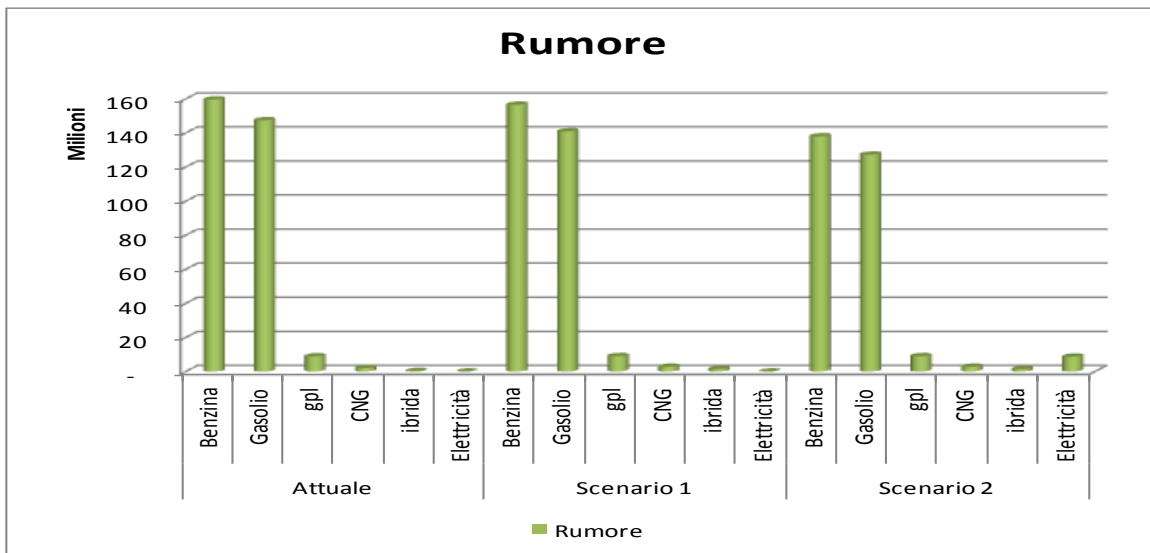


Figura 28: Costo dell'inquinamento acustico per alimentazione

Fonte: Elaborazione ENEA

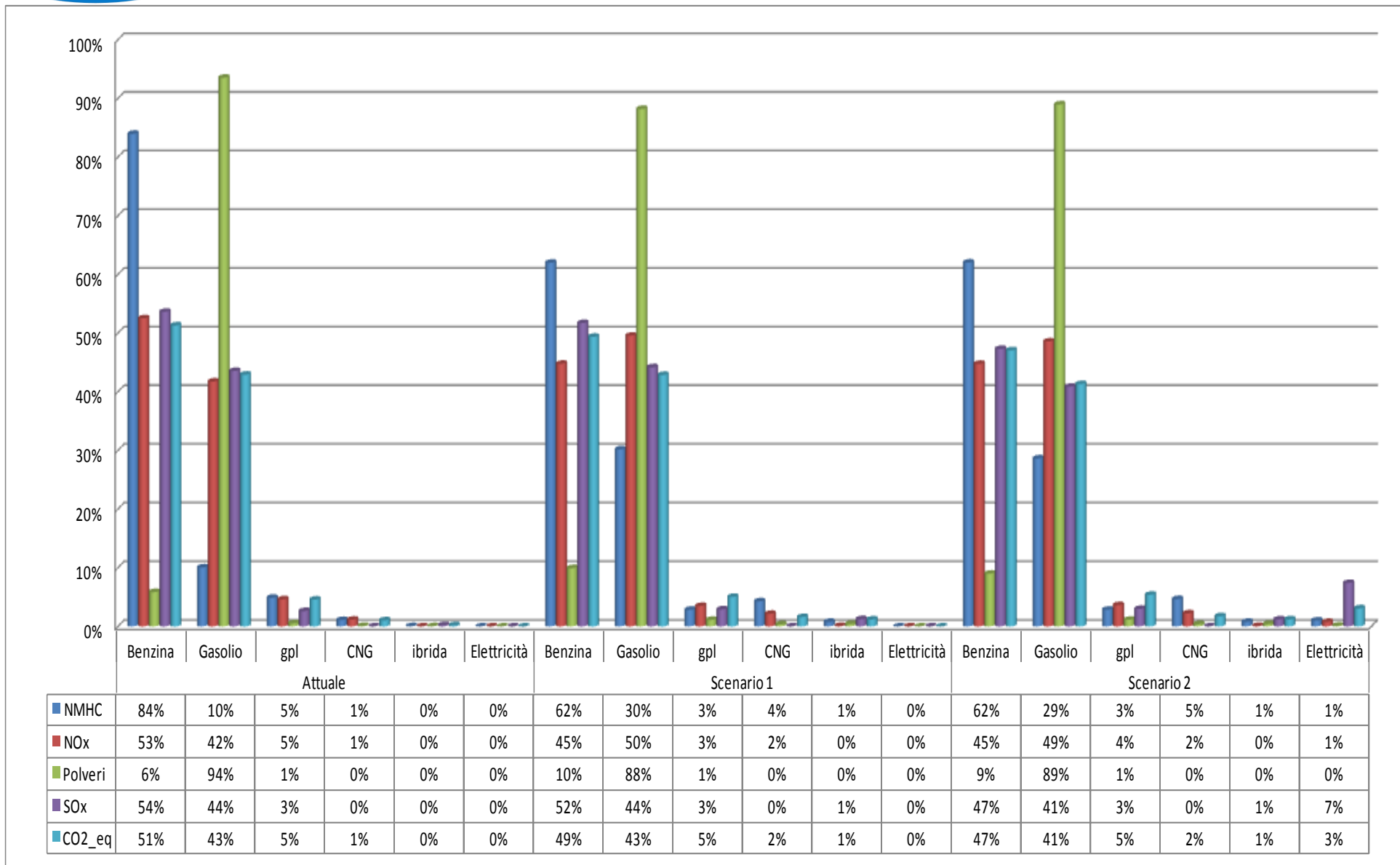


Figura 29: Quota delle emissioni nocive per alimentazione (%)

Fonte: Elaborazione ENEA

Note le percorrenze e in base alla diversa composizione del parco veicolare capitolino nei vari scenari, è stato possibile estrapolare un costo specifico a veicolo-km (v-km) delle esternalità. Le auto a metano producono, attualmente, costi esterni per 6,6 ct€/km, i più alti seguiti immediatamente dopo dalle auto a gasolio con 5,4 ct€/km e dalle auto a benzina con 4,8 ct€/km, il danno specifico prodotto dalle auto a GPL sarebbe di 3,3 ct€/km e quello delle auto ibride ammonterebbe invece a 1,6 ct€/km .

Nel primo scenario prospettico, contraddistinto da un incremento delle percorrenze delle auto GPL, delle auto a metano e delle auto ibride, gli effetti sul costo specifico a km delle esternalità generate dalle emissioni nocive è molto evidente. Complessivamente, il costo a v-km più elevato è rilevato nel caso delle auto a gasolio, pari a 4,5 ct€/km seguite dalle auto a metano con 4,3 ct€/km e dalle auto a benzina con 4 ct€/km.

Nel secondo scenario, aumentano le percorrenze delle auto a GPL e a metano, anche se in modo più contenuto rispetto allo scenario precedente, più consistente è la quota dei km percorsi dalle auto ibride e compaiono i veicoli elettrici, che generano esternalità pari a 1 ct€/km.

Tabella 30: Esternalità parco veicolare privato e TPL capitolino

Attuale						
	Benzina	Gasolio	gpl	CNG	ibrida	Elettricità
	ct€/km					
Emissioni nocive	3,3	3,8	2,5	5,1	1,2	0
Rumore	1,5	1,6	0,8	1,5	0,4	0
TOTALE	4,8	5,4	3,3	6,6	1,6	0

Scenario 1						
	Benzina	Gasolio	gpl	CNG	ibrida	Elettricità
	ct€/km					
Emissioni nocive	2,4	2,9	2,0	3,2	1,2	0
Rumore	1,5	1,6	0,8	1,0	0,4	0
TOTALE	4,0	4,5	2,8	4,3	1,6	0

Scenario 2						
	Benzina	Gasolio	gpl	CNG	ibrida	Elettricità
	ct€/km					
Emissioni nocive	2,5	2,9	2,0	3,2	1,2	0,6
Rumore	1,4	1,4	0,8	1,0	0,4	0,4
TOTALE	3,8	4,3	2,8	4,2	1,6	1,0

Fonte: Elaborazione ENEA

Il costo specifico per ciascuna delle due categorie di esternalità, è pari a 3,4 ct€/km per le emissioni nocive e a 1,5 ct€/km per il rumore, per un totale di 5 ct€/km.

Nel primo scenario, il costo specifico delle emissioni nocive scende a 2,6 ct€/km, rimane piuttosto stabile il costo specifico del rumore, non essendo molto interessato dal tipo di sostituzione dei veicoli sperimentata in questo scenario; in totale, il valore specifico del danno generato per ogni km percorso, sarebbe in questo caso pari a 4,1 ct€/km.

Nel secondo scenario prospettico, le emissioni nocive genererebbero danni per 2,4 ct€ per ogni km percorso e quelli del rumore sarebbero pari a 1,2 ct€/km; per ogni unità di percorrenza il totale del costo esterno sarebbe di 3,7 ct€/km, il 26 % in meno rispetto alla situazione attuale.

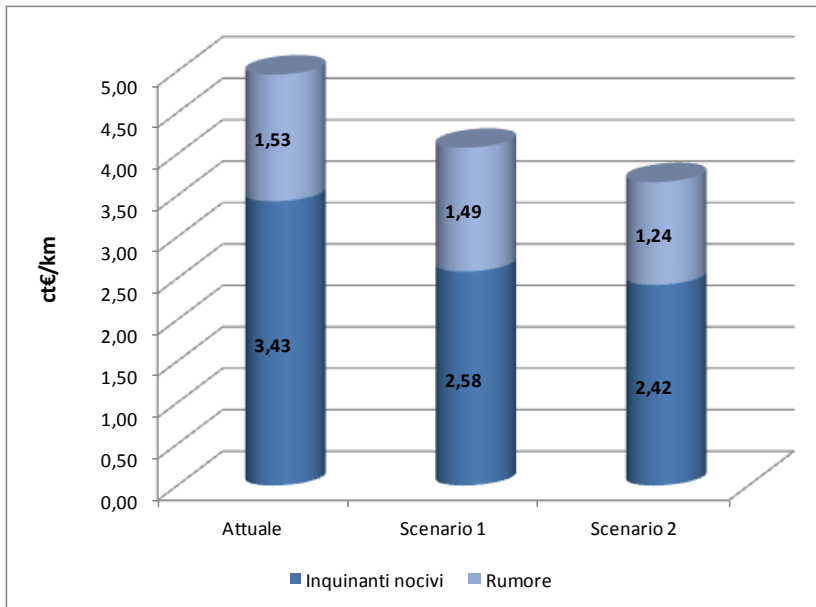


Figura 30: Stima costi esterni specifici v-km nei vari scenari

6 Riferimenti bibliografici

1. ENEA, "Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2016"
(<http://www.enea.it/it/pubblicazioni/pdf-volumi/raee-2016-versione-integrale.pdf>)
2. EEA, "Technical Report 12/2013 - EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2013", Part B: 1.A.3.b.i-iv Energy Combustion – Exhaust emissions from road transport update 2014 (<http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>)
3. INRETS, "Artemis deliverable 3 – Emission factor modelling and database for light vehicles", Report n. LTE 0523, Giugno 2007 (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00916945/document>)
4. www.terna.it dati statistici - accesso 01/08/16
5. www.gse.it - accesso 01/08/16
6. ISPRA, "Italian Emission Inventory 1990-2014 - Rapporto 240/2016"
(<http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/informative-inventory-report/view>)
7. ISPRA, "National Inventory Report 2016 – Rapporto 239/2016"
(<http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/national-inventory-report/view>)
8. ISPRA, "Fattori di emissione per la produzione ed il consumo di energia elettrica in Italia"
(http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-la-produzione-ed-il-consumo-di-energia-elettrica-in-italia/at_download/file)
9. MiSE, "Bilancio Energetico Nazionale" (<http://dgsaie.mise.gov.it/dgerm/ben.asp>)
10. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_production,_consumption_and_market_overview#Source_data_for_tables.2C_figures_and_maps_on_this_page_.28MS_Excel.29
11. JRC, "Analyzing on-road emissions of light-duty vehicles with Portable Emission Measurement Systems (PEMS)", EUR 24697 EN – 2011
(<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/analyzing-road-emissions-light-duty-vehicles-portable-emission-measurement-systems-pems>)
12. TNO, "Detailed investigations and real-world emission performance of Euro 6 diesel passenger cars", R10702, 2015
(<http://repository.tudelft.nl/search/tno/?q=title%3A%22Detailed%20investigations%20and%20real-world%20emission%20performance%20of%20Euro%206%20diesel%20passenger%20cars%22>)