



## Ricerca di Sistema elettrico

Simulatore di scenari urbani di mobilità  
veicolare elettrica: specifiche interfaccia  
utente, verifica del sistema integrato di  
modelli e valutazione scenari di  
elettrificazione della mobilità veicolare

G. Valenti, C. Liberto, F. Spinelli

## SIMULATORE DI SCENARI URBANI DI MOBILITÀ ELETTRICA

G. Valenti, C. Liberto, F. Spinelli (ENEA)

Settembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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

Progetto: Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: a. Scenari di mobilità elettrica

Responsabile del Progetto: Maria Pia Valentini, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	10
2.1 OBIETTIVI E ARTICOLAZIONE DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA .....	10
2.2 ORGANIZZAZIONE DELL'ATTIVITÀ DI RICERCA .....	11
2.3 STRUTTURA E CARATTERISTICHE DEL SIMULATORE .....	13
2.4 APPROCCIO METODOLOGICO E SCHEMA MODELLISTICO .....	14
3 L'INTERFACCIA UTENTE.....	20
4 VALIDAZIONE E SPERIMENTAZIONE.....	26
4.1 IL CASO DI STUDIO DELLA CITTÀ METROPOLITANA DI ROMA .....	26
4.2 IL CHARGING STATION MODULE .....	27
4.3 L'ELECTRIC VEHICLE MODULE (EVM) .....	28
4.4 IL SOLAR RADIATION MODULE (SRM).....	31
5 ESEMPIO DI APPLICAZIONE DEL SIMULATORE.....	38
6 CONCLUSIONI.....	43

### INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 - Architettura del simulatore .....	14
Figura 2 - Schema di calcolo della domanda di energia per la ricarica dei veicoli elettrici .....	16
Figura 3 - Curve di carico aggregate per utenza domestica .....	18
Figura 4 - Struttura della finestra principale .....	20
Figura 5 - Esempio di form di inserimento dei parametri di simulazione .....	21
Figura 6 - Tabella di caricamento scenari. Gli scenari col tic verde accanto sono già stati calcolati. Gli altri sono o appena stati inseriti (cerchio) o in fase di computazione (calcolatrice).....	22
Figura 7 - Profili dei potenziali flussi di energia per applicazioni V2G.....	23
Figura 8 - Esempio di selezione giorno/ora di visualizzazione dei dati di output .....	24
Figura 9 - Esempio di selezione modalità step-by-step .....	24
Figura 10 - Esempio di serie temporale dei consumi. ....	25
Figura 11 - Esempio di grafici riassuntivi della finestra “Charts” .....	25
Figura 12 - Densità abitativa (abitanti/kmq) per zona urbanistica e Municipio di Roma .....	26
Figura 13 - Dislocazione dei parcheggi di scambio a Roma .....	27
Figura 14 - Evoluzione del mercato italiano delle automobili per segmento - Quote% (Fonte UNRAE) .....	30
Figura 15 - Risultati del test di simulazione delle curve di consumo (mese di Gennaio) .....	31
Figura 16 - Variazione giornaliera dell’andamento annuo della temperatura media in diverse fasce orarie per la località “GRA – Anagnina” .....	35
Figura 17 - Variazione giornaliera dell’andamento annuo della irradianza globale orizzontale media in diverse fasce orarie per la località “GRA – Anagnina” .....	35
Figura 18 - Anno statistico con passo temporale orario (esempio) .....	36
Figura 19 - Anno statistico con passo temporale pari a un quarto d’ora (esempio).....	37
Figura 20 – Profilo orario dei viaggi simulati per l’intera area metropolitana di Roma .....	39
Figura 21 – Profili orari dei consumi totali riferiti alla ricarica domestica e pubblica .....	39
Figura 22 – Zone di analisi dei risultati delle simulazioni .....	40
Figura 23 – Profilo orario delle auto in sosta .....	41
Figura 24 – Profilo orario delle auto in fase di carica per tipo di ricarica.....	41
Figura 25 – Profilo orario del consumo elettrico per tipologia di ricarica.....	42
Figura 26 – Profilo orario di energia per l’accumulo e i servizi di rete in modalità V2G .....	42

### INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - Tipologie di ricarica e attributi delle colonnine di ricarica.....	28
Tabella 2 - Tipologie di auto elettriche e attributi.....	29
Tabella 3 - Località per le quali è stato ricavato l’anno statistico meteorologico.....	32

## Sommario

La transizione verso una mobilità sostenibile caratterizzata da una progressiva penetrazione di flotte di veicoli elettrici ha negli ultimi anni acquisito sempre maggiore centralità nelle politiche di sviluppo delle città intelligenti del futuro.

In questa ottica è di cruciale importanza studiare e realizzare soluzioni efficienti e ben mirate per lo sviluppo di una rete di ricarica pienamente adeguata alle esigenze di autonomia dei veicoli, di gestione efficace dei conseguenti sovraccarichi della rete elettrica e di maggior utilizzo di energia derivante da fonti rinnovabili.

Il documento riporta i risultati ottenuti dal team ENEA nel corso del secondo e ultimo anno di ricerca finalizzata allo sviluppo e validazione di un simulatore per l'analisi e la valutazione di scenari legati alla diffusione di flotte di veicoli elettrici in contesti urbani e metropolitani. Il simulatore è inteso come un nuovo strumento di ausilio alla pianificazione e progettazione degli interventi infrastrutturali e tecnologici necessari a garantire una rapida ed efficiente transizione verso la mobilità elettrica.

La ricerca è stata svolta congiuntamente dal laboratorio "DTE-PCU-STMA" dell'ENEA, dal Dipartimento di Fisica (DF) dell'Università di Roma "La Sapienza" e dal Dipartimento di Ingegneria (DI) dell'Università degli Studi "RomaTRE".

Nel corso di questa seconda ed ultima annualità si è proceduto con la progettazione di dettaglio, lo sviluppo software del prototipo, la validazione della suite di modelli e la sperimentazione del simulatore assumendo come caso di studio l'area metropolitana di Roma. È stato realizzato un ambiente di simulazione, accessibile anche via WEB, capace di riprodurre e visualizzare su diverse scale spaziali e temporali le fluttuazioni della domanda di energia elettrica, corrispondenti a diverse ipotesi di diffusione dei veicoli elettrici, di configurazione dei punti di ricarica e di comportamento dei singoli individui nelle scelte di ricarica.

L'elemento qualificante del simulatore è costituito dallo schema modellistico definito per riprodurre i pattern di mobilità elettrica che caratterizzano l'area di studio e la conseguente distribuzione spaziale e temporale della domanda di energia elettrica per la ricarica dei veicoli.

Lo schema è basato su un approccio microscopico capace di rappresentare esplicitamente i singoli automobilisti, il loro comportamento, legato al soddisfacimento delle proprie esigenze di mobilità e di autonomia del veicolo, e l'interazione tra di essi. Gli automobilisti sono pertanto modellati singolarmente e ad ognuno di essi sono assegnate determinate proprietà e regole di comportamento definite a partire da osservazioni dirette basate su dati reali, da evidenze sperimentali riportate in letteratura o da ipotesi ragionevoli sul comportamento per la ricarica. Gli scenari di mobilità veicolare elettrica possono essere analizzati su scale spaziali e temporali differenti che vanno dal territorio provinciale su tempi relativi lunghi (da giornaliero a mensile), fino al singolo elemento della griglia con cui è stata discretizzata l'area di applicazione su intervalli temporali di 15 minuti.

Nel corso di quest'ultimo anno, il team ENEA ha svolto la progettazione di dettaglio del prototipo e delle interfacce con l'utente. Ha inoltre completato gli algoritmi per la caratterizzazione dell'offerta di energia elettrica includendo quella da fonti rinnovabili, dei consumi dei veicoli elettrici nelle diverse condizioni di marcia e ambientali, e per l'interazione bidirezionale tra veicoli ed infrastruttura. Il team ENEA ha inoltre coordinato le attività svolte dai partner universitari e tutte le attività previste per la specificazione delle funzioni di front-end, il test delle funzionalità del simulatore e l'applicazione del sistema di modelli per lo studio di scenari di mobilità elettrica, della conseguente domanda di energia e delle interazioni con la rete di distribuzione.

## 1 Introduzione

Nel settore dei trasporti la transizione verso una mobilità veicolare elettrica alimentata da fonti rinnovabili è oggi considerata come l'evoluzione più promettente per far fronte alle pressanti necessità di limitare la dipendenza energetica dai combustibili fossili, di contrastare i rischi dei cambiamenti climatici e di migliorare la qualità dell'aria, in particolar modo nelle città dove la questione inquinamento da traffico è quanto mai all'ordine del giorno per le pesanti ripercussioni sulla salute dei cittadini.

I veicoli elettrici sono particolarmente adatti alle percorrenze urbane sia per le limitate distanze percorse giornalmente sia perché più vantaggiosi nel ciclo di marcia urbano in virtù del recupero di energia in frenata e del consumo nullo nei frequenti momenti di inattività, come ad esempio durante le attese ai semafori o in coda nelle situazioni di congestione. L'elettrificazione dei veicoli non riguarda solo le auto private e aziendali ma anche le flotte per i servizi di mobilità condivisa, di distribuzione delle merci e di trasporto collettivo.

Sul lato dell'offerta, le normative sempre più stringenti sui limiti di emissione dei veicoli di nuova immatricolazione e il progressivo aumento dei costi in tecnologia per rispettare i più severi target stanno spingendo l'industria automobilistica a riorientare in modo deciso la produzione verso le auto elettriche.

La corsa tecnologica e la massa di investimenti che si stanno muovendo hanno come oggetto sia i veicoli per aumentarne le prestazioni, che le batterie per ridurre i costi e per aumentarne la durata, la densità energetica, i rendimenti e gli standard di sicurezza. Com'è noto l'attuale costo delle batterie incide pesantemente su quello delle auto elettriche, tuttavia esso è destinato a ridursi proprio grazie alle economie di scala e agli attesi miglioramenti nelle caratteristiche chimico-fisiche degli elementi delle batterie stesse e nei processi produttivi.

Una sfida importante per una spedita transizione è lo sviluppo di un'adeguata rete di infrastrutture di ricarica. Questo obiettivo consente di risolvere il nodo della limitata autonomia delle auto elettriche attualmente presenti sul mercato che, notoriamente, costituisce uno dei principali ostacoli alla diffusa adozione dei veicoli elettrici.

La transizione implica anche un cambiamento sostanziale di paradigma nelle operazioni di rifornimento. I luoghi di ricarica più comodi e convenienti per i possessori di veicoli elettrici sono quelli domestici o in prossimità dell'abitazione. Infatti i veicoli elettrici, stando nel box o nel posto auto per diverse ore al giorno, sono in una situazione ideale per una ricarica lenta a bassa potenza con il conseguente vantaggio di non sottoporre sia la batteria che la rete elettrica a eccessivi stress.

Il secondo luogo di ricarica più conveniente per l'utente è sicuramente quello di lavoro, dove il veicolo in genere sosta per lunghi periodi. La disponibilità di una stazione di ricarica sul posto di lavoro potrebbe fare la differenza tra acquistare o no un veicolo elettrico soprattutto nei casi in cui il veicolo non possa essere ricaricato presso la propria abitazione.

Luoghi ideali per la ricarica sono inoltre i parcheggi pubblici così come gli spazi, dove si prevedono soste meno lunghe, di almeno un paio di ore, quali cinema, centri commerciali, centri sportivi e ristoranti. Infine per consentire alle auto elettriche di compiere anche lunghi percorsi, sarà importante attrezzare i distributori di carburante sulle tangenziali, sulle strade extra-urbane e sulle autostrade con sistemi di ricarica veloce (da 30 minuti a 1 ora) e ultra veloce (10-15 minuti).

La crescente diffusione di veicoli elettrici nei centri urbani, accompagnata dall'indispensabile rete di stazioni di ricarica, porterà inevitabilmente a ulteriori carichi di domanda in alcuni punti della rete elettrica. Gli effetti che tali aumenti potrebbero avere sulla rete elettrica dipendono da vari fattori, tra i quali il periodo, la durata, il luogo e la modalità di ricarica.

Il consumo annuo di energia di un'auto elettrica, che percorre intorno a 11.000 km/anno, risulta paragonabile al consumo annuo di una famiglia media (circa 2.500 kWh/anno), in più la ricarica di una sola auto richiede la stessa energia che un appartamento medio assorbe in poco più di tre giorni.

Gli attuali consumi annui di energia elettrica in Italia si attestano intorno ai 302.000 GWh. Considerando l'incidenza dei diversi comparti risulta che circa il 41% del consumo finale è assorbito dal settore industriale, circa il 35% dal settore terziario, circa il 22% dal settore domestico ed approssimativamente il 2% dal settore agricolo.

In base alle attuali stime di consumo elettrico, di consistenza del parco auto circolante e di chilometraggio medio percorso annualmente, il fabbisogno aggiuntivo di energia elettrica necessario a sostenere la sostituzione del 50% dell'attuale parco con auto elettriche potrebbe attestarsi intorno al 10% del consumo finale di energia elettrica.

Con questi numeri, situazioni di sovraccarico potrebbero verosimilmente verificarsi in caso di assorbimento simultaneo di molte vetture in un'area ristretta e, in particolar modo, durante i periodi di picco dei consumi elettrici. Anche le ricariche veloci con alti livelli di potenza, difficilmente prevedibili in termini di timing e profili di ricarica, potrebbero creare problemi di sovraccarico nella rete elettrica.

Per far fronte a queste criticità si potrà intervenire collegando direttamente le stazioni di ricarica rapida alle linee di media tensione oppure predisponendo adeguati sistemi di accumulo in grado di immagazzinare l'energia prodotta durante le ore di bassa domanda per poi rilasciarla durante i picchi di domanda o nelle situazioni di emergenza.

I sistemi di accumulo inoltre rivestono un ruolo cruciale nella gestione energetica delle fonti rinnovabili intermittenti come l'eolico e il fotovoltaico e, più in generale, nello sviluppo di soluzioni "Smart Grid" in grado di gestire in modo flessibile e sicuro le forti variazioni alla quantità di corrente elettrica immessa e trasportata

Sono sempre più diffusi i progetti e le sperimentazioni di stazioni di ricarica alimentate da fonti rinnovabili o all'interno di micro reti elettriche. Queste soluzioni impiantistiche che realizzano il concetto di energia a Km zero e a zero emissioni rafforzano i vantaggi energetici ed ambientali della mobilità veicolare elettrica. L'energia a km zero presenta in più il vantaggio di accorciare la filiera tra produzione e consumo e di ridurre ulteriormente il costo di acquisto dell'elettricità da parte dell'utente finale.

Sta sempre più destando un certo interesse la sperimentazione del sistema Vehicle-to-Grid (V2G) che, consentendo il flusso bidirezionale di energia tra veicolo e rete, permetterà la piena integrazione energetica tra i veicoli elettrici e la rete elettrica.

L'implementazione del sistema V2G consentirà di impiegare le batterie dei veicoli elettrici parcheggiati e collegati alla rete elettrica per lo stoccaggio dell'eventuale energia prodotta in eccesso e, quindi, di gestire al meglio quella prodotta da fonti rinnovabili. Al contrario, in caso di carenza di energia, i veicoli elettrici potrebbero costituire una riserva rapida in grado di soddisfare i picchi di domanda, allentando la pressione sulle utility legata alla disponibilità di riserve di energia e offrendo allo stesso tempo ai proprietari dei veicoli una forma di compenso monetario.

Il sistema V2G è senza dubbio un valido metodo alternativo per lo stoccaggio dell'energia elettrica su larga scala dato che la maggior parte delle automobili viene impiegata solo per un'ora o due al giorno e rimane inattiva per il resto del tempo. In definitiva una vasta flotta di automobili elettriche parcheggiate può rappresentare una straordinaria opportunità per una migliore gestione dei picchi di domanda di energia elettrica e una maggiore integrazione di energia prodotta da fonti rinnovabili.

Diverse sono le modalità in cui il veicolo elettrico può restituire servizi alla rete come: Vehicle-to-Building (V2B), Vehicle-to-Home (V2H) e Vehicle-to-Grid (V2G). Si tratta di contesti in cui l'auto, con una totale inversione di ruoli, può fungere anche da generatore di emergenza per le utenze domestiche in caso di blackout, oltre che contribuire a livellare i picchi di utilizzo dell'energia elettrica con la riduzione dei costi dell'energia.

La transizione verso la mobilità elettrica è un percorso graduale profondamente condizionato da un contesto tecnologico e organizzativo piuttosto articolato e in continua evoluzione. Nella predisposizione di piani e interventi infrastrutturali per la mobilità elettrica assume un'importanza strategica l'individuazione delle specifiche esigenze e caratteristiche della realtà territoriale coinvolta. In altri termini è fondamentale stimare i profili di mobilità in relazione all'uso delle vetture al fine di identificare gli utilizzatori potenziali, comprendere come impiegheranno i veicoli e quali necessità di ricarica potranno avere. E' inoltre di fondamentale importanza realizzare la corretta integrazione dell'infrastruttura di ricarica con la rete di distribuzione ricorrendo a tecnologie smart per bilanciare meglio le fluttuazioni della domanda energetica ed estendere lo sfruttamento all'energia prodotta da fonti rinnovabili.

In questo documento sono riportati i risultati del secondo e ultimo anno di ricerca finalizzata alla realizzazione di un simulatore su scala urbana per l'analisi di scenari futuri di penetrazione di veicoli a trazione elettrica, sia in modalità "full electric" che ibrida plug-in, nel parco auto circolante e nelle flotte di autobus utilizzate per il trasporto pubblico locale.

La ricerca è nata dall'esigenza di fornire uno strumento attendibile per lo studio di interventi e soluzioni capaci di migliorare l'efficienza e l'affidabilità delle infrastrutture di ricarica, di bilanciare meglio le fluttuazioni dell'approvvigionamento e della domanda energetica e, infine, di estendere l'utilizzo dell'energia prodotta da fonti rinnovabili.

Il simulatore è stato concepito come piattaforma modellistica integrata capace: di replicare gli spostamenti giornalieri dei veicoli all'interno di un'area urbana, di riprodurre l'interazione della domanda di energia con l'offerta costituita dalla rete di punti di ricarica, di stimare l'andamento dei profili giornalieri di potenza e consumo di energia richiesti per soddisfare le diverse esigenze di mobilità e di valutare eventuali rischi di locale sovraccarico della rete di distribuzione in corrispondenza dei picchi di domanda del settore residenziale e terziario.

Il simulatore è inteso pertanto come strumento per studiare i comportamenti degli utenti dei veicoli elettrici nella scelta della stazione e della modalità di ricarica e, conseguentemente, di stimare la ripartizione della suddetta domanda tra le diverse alternative a disposizione nelle varie zone della città. Questa funzione è di particolare utilità nella geo-localizzazione ottimale delle stazioni per la ricarica e del relativo dimensionamento, come pure nello studio di misure di gestione della domanda di energia (ad esempio l'introduzione di una tariffazione dinamica) per contenere i picchi di domanda incentivando le operazioni di ricarica delle batterie durante le ore di morbida.

Il simulatore è inoltre pensato come strumento di ausilio allo studio di fattibilità di soluzioni impiantistiche che prevedono stazioni di ricarica alimentate da pannelli fotovoltaici collegati a sistemi di accumulo. A tal fine sono stati sviluppati algoritmi per l'analisi locale della domanda di energia per la ricarica dei veicoli e della produzione di energia tramite pannelli fotovoltaici a partire dai livelli di irradiazione solare dell'area in cui viene installato l'impianto.

Queste soluzioni possono prevedere l'utilizzo delle batterie automotive giunte a fine vita come accumuli stazionari che, oltre ad assorbire la produzione intermittente delle rinnovabili e prelevare elettricità nei momenti di bassa domanda (e tariffe scontate), possono essere impiegate per la costituzione di una riserva di potenza e rendere più rapido il rifornimento dei mezzi elettrici.

Il simulatore è stato ideato anche per l'analisi di scenari V2G (vehicle-to-grid) in cui i veicoli possono programmare la ricarica in funzione delle necessità di viaggio dell'utente e della rete di distribuzione in modo da bilanciare i carichi energetici. In più, la soluzione V2G può sostenere l'integrazione delle fonti rinnovabili consentendo ai veicoli di accumulare l'energia nei momenti di picco di produzione da parte delle fonti rinnovabili per poi reimmetterla in rete quando serve.

Il simulatore incorpora anche modelli di analisi della mobilità multimodale per lo studio di interventi di installazione o potenziamento delle infrastrutture di ricarica nell'ambito di parcheggi di scambio in prossimità di stazioni o fermate del trasporto pubblico. In questo caso l'analisi della mobilità multimodale può essere di grande utilità per la valutazione degli impatti in termini di riduzione delle percorrenze con l'auto privata e di contenimento dei carichi energetici nelle zone più critiche.

Caratteristica principale del simulatore è di utilizzare raccolte estese di dati geo-referenziati sugli spostamenti effettuati da un campione di veicoli, nonché dati pubblicati in modalità "Open-Data" sul programma di esercizio e sulla struttura della rete del TPL.

Il vantaggio di utilizzare una consistente collezione di tracce GPS di un campione di veicoli risiede proprio nella possibilità di ricostruire gli effettivi profili di mobilità spazio-temporale dei veicoli all'interno del territorio urbano 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.

Il simulatore è stato verificato e testato assumendo come caso di studio l'area metropolitana di Roma. Il sistema di modelli è stato costruito e calibrato utilizzando dati e informazioni sull'assetto insediativo e territoriale, sugli aspetti socio-economici, sulle condizioni climatiche e meteo, sugli spostamenti e sulle soste effettuate da un consistente campione di veicoli privati e dal programma di esercizio del parco autobus per il TPL.

L'attività di test ha riguardato inoltre sia il front end dell'ambiente software ossia la parte visibile all'utente e con cui egli può interagire (interfaccia utente), sia il back-end ovvero la parte che non è visibile, ma che esegue tutte le operazioni alla base del funzionamento del simulatore.

Sono stati inoltre studiati e valutati scenari futuri di penetrazione di flotte di veicoli elettrici, di configurazione della rete di colonnine di ricarica e di interazione dei veicoli con la rete di infrastrutture di ricarica per valutare e sperimentare le capacità e potenzialità del simulatore.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Obiettivi e articolazione delle attività di ricerca

L'idea centrale della ricerca è stata di sviluppare, in un periodo di due anni, un ambiente di simulazione atto a riprodurre scenari urbani di penetrazione di veicoli a trazione elettrica, sia in modalità "full electric" che ibrida plug-in, nel parco auto circolante e nelle flotte di autobus utilizzate per il trasporto pubblico locale.

La ricerca è stata guidata in particolare dall'esigenza di strutturare una metodologia e uno strumento di simulazione di scenari di elettrificazione della mobilità veicolare urbana per l'analisi delle possibili ripercussioni sulla rete di distribuzione elettrica, per la progettazione della rete di infrastrutture di ricarica, per lo studio di soluzioni impiantistiche di ricarica con pannelli fotovoltaici e per la definizione di strategie efficaci di gestione ottima dei flussi energetici (Smart Charging e VehicleToGrid).

Per andare incontro a questa esigenza è stato sviluppato un approccio a microscala atto a rappresentare il comportamento degli individui (automobilisti/veicoli) e a riprodurre l'intera sequenza di spostamenti, soste e ricariche effettuata dai veicoli stessi in un prefissato periodo di tempo (giorno, settimana, mese) nell'area di applicazione.

La simulazione a microscala consente, inoltre, di valutare eventuali sovraccarichi locali legati alla sovrapposizione con i carichi elettrici del settore residenziale/terziario e di verificare la fattibilità di soluzioni impiantistiche per lo sfruttamento dell'energia prodotta con pannelli fotovoltaici.

L'ambiente di simulazione è stato concepito per essere accessibile via WEB da remoto ed include una suite di modelli, appositamente sviluppati, in grado di quantificare e stimare l'andamento dei consumi elettrici associati a predefiniti scenari di mobilità elettrica urbana con una elevata granularità spaziale e temporale.

Nel corso del primo anno sono stati definiti gli obiettivi, i requisiti funzionali dell'ambiente di simulazione e le possibili soluzioni implementative per conseguire gli obiettivi funzionali attesi e per realizzare le modalità ottimali di interazione con l'utente.

In particolar modo le attività del primo anno sono state finalizzate alla definizione dell'ossatura metodologica e modellistica che costituisce l'asse portante delle funzionalità principali dell'ambiente di simulazione.

Sono state appunto studiate e definite le proprietà teoriche dei modelli utilizzati per riprodurre gli schemi di mobilità e sosta degli individui, le interazioni con la rete di infrastrutture di ricarica e la distribuzione spaziale e temporale dei carichi sulla rete elettrica incluso il potenziale apporto energetico da parte delle fonti rinnovabili.

In sintesi, i principali moduli studiati e definiti nel corso del primo anno sono:

- Il Trajectory Generation Module (TGM), formulato per riprodurre l'intera sequenza di spostamenti effettuati da ogni singolo veicolo elettrico circolante nell'area di studio nell'arco temporale di un giorno, una settimana o un mese. Il TGM, costruito e messo a punto in base ai dati reali di viaggio registrati da un consistente campione di veicoli circolanti nell'area di applicazione, riproduce la catena di spostamenti di ciascun veicolo attraverso l'individuazione delle zone visitate e il calcolo delle distanze percorse con i relativi orari di partenza, arrivo e sosta.
- Il Park & Ride Module (PRM), definito per riprodurre gli spostamenti multimodali e caratterizzare la domanda di sosta nei parcheggi di interscambio con i sistemi di trasporto collettivo urbano. Il PRM consente inoltre di studiare gli effetti sui pattern di viaggio conseguenti all'introduzione di misure infrastrutturali e gestionali volte a promuovere l'uso dei parcheggi di interscambio e a scoraggiare l'accesso delle auto alle aree centrali più congestionate della città.
- L'Electric Vehicle Module (EVM), progettato per caratterizzare la composizione e le prestazioni delle flotte di veicoli elettrici e calcolare lo stato di carica (SOC) della batterie al termine di ogni spostamento. Il calcolo del SOC dipende dalla tipologia di veicolo, dalla lunghezza del viaggio, dalle condizioni di marcia, dalla pendenza media (solo per gli autobus) e dalle condizioni climatiche che si possono manifestare nel corso dell'anno nell'area di studio.
- Il Charging Behaviour Module (CBM) definito per riprodurre le scelte di ricarica dei veicoli (punto di ricarica, orario, durata e quantità di energia). Il processo decisionale alla base del CBM è guidato principalmente dallo stato di carica (SOC) della batteria, dalla successiva necessità di spostamento, dalla disponibilità di un punto di ricarica, dalla modalità di ricarica disponibile (standard, accelerata o rapida) e dalla durata della sosta.

- Il Charging Stations Module (CSM), ideato per la modellazione dell'offerta di ricarica (dislocazione sul territorio e modalità di funzionamento delle colonnine di ricarica) e la stima del carico sulla rete di distribuzione di energia elettrica in funzione della tipologia di ricarica (lenta, accelerata, veloce e ultra-veloce), della richiesta di energia dei veicoli collegati ai punti di ricarica e delle principali perdite che si possono presentare in fase di ricarica;
- Il Photovoltaic Energy Production Module (PEPM), concepito per la costruzione della mappatura locale, a determinate scale temporali, della radiazione solare utilizzando appropriati modelli di comportamento dell'atmosfera e, più specificatamente, per la caratterizzazione dei flussi energetici abbinati a soluzioni impiantistiche di ricarica con pannelli fotovoltaici; il modulo consente in particolare di stimare il dato di radiazione solare a partire da un opportuno indice di copertura nuvolosa che si ottiene confrontando una specifica immagine del pianeta visto dal satellite, con una sua rappresentazione in condizioni di cielo sereno.

Nel simulatore sono include inoltre le procedure di post-processing per l'elaborazione, il confronto e la presentazione dei risultati delle simulazioni.

Le procedure di post-processing forniscono gli andamenti tipici dei profili temporali dei carichi energetici generati e prelevati nelle diverse zone della città, facilitano l'identificazione di situazioni di criticità legate a picchi locali di domanda e costituiscono la base di riferimento per lo studio di soluzioni di gestione ottima dei flussi energetici.

Nel corso del secondo anno le attività hanno riguardato il completamento delle specifiche di dettaglio delle funzionalità e dell'interfaccia utente, la costruzione del prototipo, l'integrazione, calibrazione e verifica della suite di modelli e la sperimentazione nell'area metropolitana di Roma.

L'ambiente software di simulazione interattiva rappresenta, pertanto, la sintesi dei modelli sviluppati nel corso del primo anno, i quali sono stati opportunamente integrati, adattati e ottimizzati al fine di realizzare la loro completa integrazione funzionale.

L'ambiente software offre una visualizzazione agile ed informativa sotto forma di tabelle, grafici e mappe in grado di rendere conto globalmente e puntualmente sullo stato della domanda e dell'offerta energetica, nonché delle fluttuazioni spaziali e temporali del flusso elettrico. Le quantità visualizzate sono il risultato delle simulazioni ottenute attraverso l'uso integrato dei modelli.

L'ambiente consente la possibilità di interagire con la simulazione, offrendo un'interfaccia semplice ed intuitiva attraverso la quale creare e modificare le ipotesi di dislocazione delle stazioni di ricarica e di assegnazione delle modalità di ricarica (lenta, accelerata e rapida). L'interfaccia utente permette inoltre di configurare gli scenari di mobilità veicolare, in particolare di prefissare la consistenza, la composizione e la dislocazione della flotta di veicoli a trazione elettrica ed ibrida nelle diverse zone della città.

Alla fase di sviluppo del prototipo è seguita l'attività di verifica e test per individuare eventuali malfunzionamenti e di risolverli prima del rilascio finale del prototipo software. L'attività di test è stata articolata nelle due sotto-attività di test dei singoli moduli e del sistema integrato. Questa attività è stata finalizzata ad assicurare la conformità del software realizzato ai requisiti stabiliti, valutandone la correttezza funzionale rispetto alle specifiche.

L'attività conclusiva è stata l'applicazione del sistema di modelli per lo studio di scenari di penetrazione di flotte di veicoli elettrici. In particolare l'attività conclusiva ha permesso di stimare per diverse ipotesi di penetrazione delle flotte di auto e bus elettrici le conseguenti variazioni spaziali e temporali del fabbisogno energetico nell'area metropolitana di Roma

## 2.2 Organizzazione dell'attività di ricerca

L'attività di ricerca, condotta nell'arco di due anni, ha visto la partecipazione congiunta del laboratorio "Sistemi e Tecnologie per la Mobilità e l'Accumulo" (STMA) dell'ENEA, del Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "La Sapienza" e del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "RomaTRE". Nel corso del primo anno la ricerca svolta dal team del Dipartimento di Fisica è stata orientata verso lo sviluppo teorico di modelli ad agenti per riprodurre pattern realistici di mobilità veicolare urbana e comportamenti di ricarica. Lo sviluppo teorico è stato preceduto da una fase di integrazione di diverse fonti

di dati per l'estrazione di pattern statistici di mobilità e la caratterizzazione del comportamento di ciascun singolo automobilista.

Le fonti di dati utilizzate per lo sviluppo e la calibrazione del sistema di modelli sono stati i tracciati GPS di un campione di veicoli sonda, la struttura e il programma di esercizio del TPL, le grandezze socio-economiche per zona censuaria e il piano di installazione delle colonnine di ricarica pubbliche recentemente elaborato dai tecnici del Comune di Roma.

Nella modellizzazione a microscala gli automobilisti sono esplicitamente rappresentati e raffigurati mediante algoritmi e variabili che ne definiscono il comportamento tipico nelle scelte di mobilità come ad esempio il numero di spostamenti per giornata tipo, gli orari di partenza e la durata, le zone di destinazione e la corrispondente distanza percorsa giornalmente. La modellizzazione include inoltre gli algoritmi e le variabili esplicative più significative per riprodurre il comportamento dei conducenti nei riguardi della ricarica elettrica in relazione a possibili configurazioni dell'infrastruttura di ricarica e di congestione dei punti di ricarica.

In questo ultimo anno il team del Dipartimento di Fisica ha portato a compimento l'attività di integrazione e test del sistema di modelli utilizzato per riprodurre le scelte di mobilità e le interazioni con le infrastrutture di ricarica.

Il team ha inoltre curato lo sviluppo software del simulatore secondo una tipica architettura Client-Server per essere accessibile da qualsiasi postazione. L'ambiente software è stato strutturato in due parti: il front-end ed il back-end. Il front-end costituisce la parte visibile dagli utenti con la quale essi possono interagire per predisporre gli scenari, eseguire le simulazioni e visualizzare dati e risultati su mappa. Il back-end è invece la parte software che permette l'effettivo funzionamento del simulatore. La parte di back-end, accessibile indirettamente dall'utente esclusivamente attraverso l'applicazione front-end, è costituita da tutti gli algoritmi necessari per le simulazioni degli scenari richiesti dall'utente ed, inoltre, ospita i sistemi sui quali risiedono le banche dati.

La ricerca svolta dal team del Dipartimento di Ingegneria è stata indirizzata, invece, allo studio e sviluppo di un modello comportamentale al fine di riprodurre le scelte di mobilità di tipo "Park & Ride". L'approccio modellistico utilizzato è di tipo data-driven. L'idea sottostante tale approccio è di estrarre da grandi quantità di dati reali sugli spostamenti effettuati da un campione di veicoli, sull'offerta di parcheggi di scambio e sul servizio del TPL, il set di attributi più rilevanti e significativi per rappresentare la scelta di spostamenti basati sull'uso combinato auto-TPL.

Scopo del modello è quello di riprodurre per ciascuna zona di traffico, in cui viene suddiviso il territorio, la quota di spostamenti in uscita diretti verso i parcheggi di scambio più accessibili. Questo tipo di modellizzazione è inoltre funzionale allo studio degli effetti sulla domanda di sosta conseguenti a misure e incentivi volti a incrementare l'uso delle aree di sosta periferiche d'interscambio per decongestionare il traffico nelle aree più centrali. Lo schema modellistico elabora i risultati anche per singolo parcheggio di interscambio presente nell'area di applicazione, in particolare: l'occupazione e la durata media della sosta, il bacino geografico d'utenza e il profilo giornaliero di ricarica associato a specifici scenari di penetrazione dei veicoli elettrici.

Nel corso del secondo anno è stata completata la fase di calibrazione, nonché l'integrazione funzionale del modello di Park & Ride con il modello di riproduzione delle scelte di viaggio per la simulazione di politiche di sostegno alla multimodalità e limitazione della circolazione delle auto private nella zone più centrali.

Infine la ricerca svolta dal team ENEA è stata quella di definire i requisiti funzionali dell'ambiente di simulazione e di individuare la soluzione implementativa migliore atta a garantire gli obiettivi funzionali e le modalità di interazioni con l'esterno.

L'ENEA ha inoltre portato avanti lo studio delle proprietà dei modelli atti a rappresentare il funzionamento delle stazioni di ricarica e le prestazioni dei veicoli a trazione elettrica e ibrida, con tecnologia Plug-In, inclusi gli autobus per il trasporto urbano collettivo. Il calcolo dei consumi energetici e dello stato di carica dei veicoli è in funzione della categoria del veicolo, della velocità media, della distanza percorsa e del peso trasportato nel caso dei bus. In questo schema di calcolo sono stati considerati inoltre i consumi extra legati al funzionamento dei dispositivi ausiliari di bordo per il condizionamento termico e le perdite connesse con le operazioni di carica e scarica delle batterie incluse quelle delle stazioni di ricarica.

Il team ENEA ha inoltre sviluppato gli algoritmi per la predisposizione della mappatura su base oraria della radiazione solare nell'area studio con l'obiettivo di supportare la stima del potenziale energetico ottenibile dall'installazione di impianti fotovoltaici in corrispondenza di aree parcheggio e/o in prossimità di stazioni di ricarica. La mappatura, riferita a diversi periodi dell'anno, è stata ricavata con una risoluzione spaziale piuttosto elevata al fine di evidenziare le possibili variazioni tra le diverse zone della città.

Infine, sono stati definiti metodi di elaborazione dei risultati delle simulazioni per l'analisi di strategie di smart-charging e la valutazione delle potenzialità di schemi V2G per il pieno sfruttamento degli impianti alimentati da fonti rinnovabili.

Nel corso del secondo anno le attività del laboratorio STMA sono state finalizzate al completamento e implementazione dei suddetti algoritmi, nonché al test del software realizzato per valutarne la correttezza funzionale rispetto alle specifiche. Il laboratorio STMA ha inoltre definito le specifiche di dettaglio dell'interfaccia utente, nonché sottoposto a test tutte le relative procedure di configurazione degli scenari e di visualizzazione dei risultati delle simulazioni.

L'ENEA ha, infine, curato l'applicazione del simulatore per lo studio di scenari di mobilità elettrica, delle relative ripercussioni sulla rete di distribuzione e del potenziale apporto di energie rinnovabili dai pannelli fotovoltaici sul fabbisogno di energia dei veicoli elettrici.

### *2.3 Struttura e caratteristiche del simulatore*

L'ambiente software del simulatore è stato sviluppato secondo una tipica architettura Client-Server per essere accessibile via web da qualsiasi postazione collegata ad Internet senza la necessità di dover installare alcun software dedicato.

Il software è stato organizzato in due parti: il front-end ed il back-end. Il front-end costituisce la parte software visibile all'utente che consente di interagire direttamente con l'ambiente di simulazione attraverso una rappresentazione visiva delle sue funzionalità. L'applicazione front-end è stata studiata per permettere all'utente, tramite un editing grafico semplice ed intuitivo, di impostare i parametri dei modelli e di definire gli scenari di mobilità elettrica.

Gli scenari possono essere definiti in termini di numero e disposizione spaziale dei possessori di veicoli elettrici, composizione delle flotte e prestazioni, numero e dislocazione delle colonnine di ricarica, tipo di comportamento per la ricarica, condizioni ambientali in termini temperatura e irraggiamento solare.

L'applicazione Front-end permette all'utente di visualizzare dati fondamentali e risultati dei processi di simulazione, sia in forma disaggregata su mappa geo-referenziata, sia in modalità aggregata, per mezzo di grafici e tabelle riassuntive, per una più agevole comprensione delle simulazioni effettuate

Il back-end è invece la parte software che permette l'effettivo funzionamento del simulatore; in particolare di ricevere in input le impostazioni relative agli scenari, di eseguire le simulazioni, di salvare i risultati e di fornire una serie di feedback all'utente tramite Front-end .

La parte di back-end, non accessibile dall'utente ma solamente dagli amministratori del simulatore, comprende l'interfaccia software con il front-end, l'archivio dati di tipo NoSQL (MongoDB) per la memorizzazione e la rappresentazione di dati eterogenei e senza schemi ed, infine, gli algoritmi implementati per la simulazione degli scenari di elettrificazione della mobilità, incluse le procedure software ausiliare per le operazioni di interrogazione dei dati di ingresso e di memorizzazione dei risultati delle simulazioni nell'archivio dati.

I dati presenti nell'archivio sono organizzati e analizzati attraverso una griglia di esagoni regolari che copre l'intera area geografica di applicazione delle simulazioni. Al singolo elemento della griglia sono, in particolare, associati i dati demografici e socioeconomici provenienti dalle indagini censuarie e campionarie disponibili.

La discretizzazione dell'area di applicazione secondo una griglia esagonale è inoltre funzionale alla modellizzazione dei pattern dei viaggi effettuati dai singoli individui, alla caratterizzazione degli impianti di ricarica e alla presentazione dei risultati delle simulazioni.

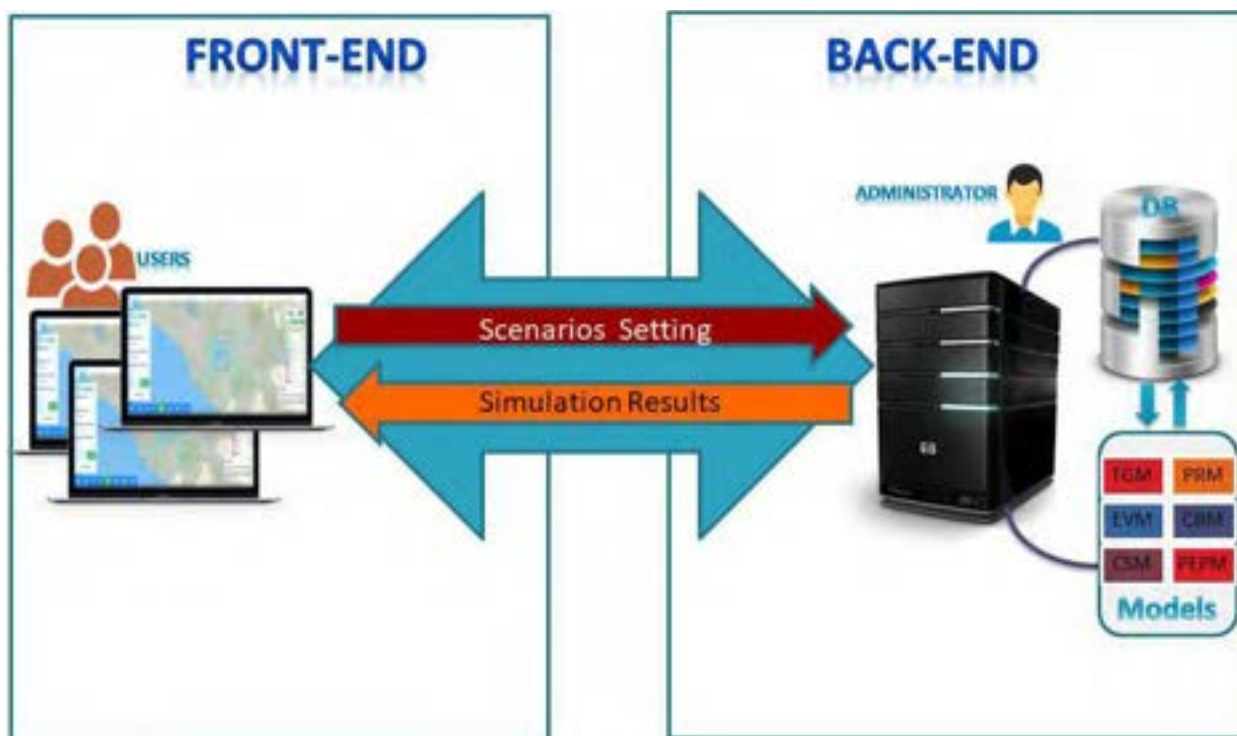


Figura 1 - Architettura del simulatore

#### 2.4 Approccio metodologico e schema modellistico

Il fine ultimo della ricerca è stato quello di realizzare un ambiente di simulazione capace di riprodurre scenari di mobilità veicolare elettrica nelle aree urbane e di contribuire così ad una maggiore comprensione delle possibili interazioni con il sistema elettrico e la produzione di energia da fonti rinnovabili.

In particolare il simulatore è stato ideato come un nuovo strumento di ausilio per:

- lo studio di scenari urbani di diffusione di veicoli elettrici nel parco auto circolante e nelle flotte di autobus del TPL;
- la stima del potenziale andamento spaziale e temporale dei consumi elettrici associati a scenari di mobilità elettrica urbana;
- la progettazione (geo-localizzazione e dimensionamento) di reti di stazioni per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica;
- la definizione di misure di smart-charging per la gestione ottima dei carichi energetici sulla base delle contingenze della rete di distribuzione;
- la valutazione di scenari Vehicle-to-Grid volti in grado di realizzare la piena integrazione energetica tra i veicoli elettrici e la rete elettrica;
- la valutazione di misure infrastrutturali e gestionali volte a promuovere l'uso dei parcheggi di interscambio e a scoraggiare l'accesso delle auto alle aree centrali più congestionate della città;
- l'analisi della fattibilità tecnica ed economica di soluzioni impiantistiche per estendere lo sfruttamento dell'energia prodotta da pannelli fotovoltaici.

Gli scenari di mobilità veicolare elettrica possono essere costruiti a partire da differenti ipotesi di configurazione della rete di punti di ricarica, di consumi e autonomia dei veicoli elettrici, di penetrazione nel parco auto circolante e nelle flotte di autobus utilizzati per il TPL e di politiche di gestione della mobilità e della sosta.

A tal fine lo schema modellistico proposto consente di riprodurre il funzionamento del sistema della mobilità veicolare di un'area urbana a livello microscopico, prendendo in considerazione il singolo conducente/veicolo e la catena di spostamenti effettuati nell'arco di una giornata tipo.

L'approccio proposto si basa sull'idea che il comportamento su larga scala della mobilità veicolare in un'area urbana possa essere descritto senza la necessità di conoscerne tutti i dettagli a livello individuale ma solo alcuni dei suoi aspetti cruciali, considerando gli individui come entità relativamente semplici.

Tale approccio permette una maggiore flessibilità nella scelta delle assunzioni che regolano comportamenti e interazioni che possono essere desunte da analisi sperimentali o empiriche. Attraverso la simulazione microscopica è infatti possibile rappresentare più classi di conducenti ognuna caratterizzata da differenti parametri comportamentali nella scelta della catena di spostamenti da effettuare non solo nell'arco di una giornata, ma anche per periodi più estesi come la settimana e il mese. Le dimensioni di scelta coinvolte, assumendo che il decisore si trovi nella zona di residenza, sono la sequenza di spostamenti da effettuare nell'arco di un giorno, le zone di destinazione e i rispettivi orari di partenza e sosta legati alla diverse finalità di viaggio.

La modellizzazione dei pattern di viaggio effettuati dai singoli individui ha previsto la ripartizione dell'area di applicazione secondo una griglia di esagoni regolari attraverso i quali è possibile descrivere, quantificare e distribuire spazialmente gli spostamenti.

Nel caso di studio della provincia di Roma le maglie della griglia sono state dimensionate in maniera tale che tra due centri di due esagoni adiacenti, risulti una distanza di circa 700 metri. Il risultato finale è stata una "griglia esagonale" di 17349 esagoni non sovrapposti

A ciascun esagono sono stati inoltre associati i dati statistici provenienti dalle tradizionali indagini censuarie sulla popolazione, sulle abitazioni e sui servizi. L'associazione dei dati statistici a ciascun esagono è stata determinata in proporzione alla percentuale di sovrapposizione geografica con una o più zone censuarie così come definite dall'ISTAT.

Come è noto le sezioni censuarie non hanno forme e dimensioni standardizzate, ma sono caratterizzate da grandezze territoriali molto diverse. Ciò può generare mappature di dati e risultati caratterizzate da un netto contrasto tra sezioni censuarie confinanti con valori diversi.

La suddivisione del territorio secondo una griglia di esagoni regolari è senza dubbio più adatta e funzionale all'elaborazione, interpretazione e visualizzazione grafica dei dati di ingresso e dei risultati delle elaborazioni sulla mobilità veicolare, sulla domanda di energia per la ricarica, sui consumi elettrici dell'utenza domestica e sulla produzione locale di energia da impianti fotovoltaici.

L'elemento caratterizzante del simulatore è lo schema modellistico definito per riprodurre i pattern di mobilità elettrica che caratterizzano l'area di studio e la conseguente distribuzione spaziale e temporale della domanda di energia elettrica per la ricarica dei veicoli.

Come già sottolineato, lo schema è basato su un approccio microscopico capace di rappresentare esplicitamente i singoli automobilisti, il loro comportamento, legato al soddisfacimento delle proprie esigenze di mobilità e di autonomia del veicolo, e l'interazione tra di essi.

Gli automobilisti sono pertanto modellati singolarmente e ad ognuno di essi sono assegnate determinate proprietà e regole di comportamento definite a partire da osservazioni dirette basate su dati reali, da evidenze sperimentali riportate in letteratura o da ipotesi ragionevoli sul comportamento.

L'approccio microscopico consente in particolare di considerare le caratteristiche e le abitudini dei singoli individui (la distanza totale e ricorrente di mobilità, il tipo e l'autonomia del veicolo, la disponibilità di un garage, etc.), e di fornire, perciò, una sufficiente flessibilità nella modellazione del comportamento adottato dai vari individui nelle scelte di mobilità e di ricarica.

Lo schema modellistico è articolato su più livelli computazionali organizzati gerarchicamente: dalla generazione dei pattern di utilizzo giornaliero, settimanale o mensile del singolo veicolo elettrico all'interno dell'area di studio, al calcolo dei consumi e dello stato di carica della batteria (SOC) al termine di ogni spostamento, alla riproduzione del comportamento dell'automobilista nelle scelte di ricarica della batteria durante le soste.

Lo schema di calcolo incorpora il modulo TGM (Trajectory Generation Module) che genera l'intera sequenza di spostamenti effettuati da un singolo veicolo nell'arco temporale di un giorno, una settimana o un mese. La catena di spostamenti di ciascun veicolo è definita attraverso l'individuazione delle zone visitate (esagoni della griglia) e il calcolo delle distanze percorse per ciascun spostamento con i relativi orari di partenza e arrivo.

L'utilizzo di ciascun veicolo è pertanto rappresentato da sequenze concatenate di spostamenti giornalieri, sistematici e non, con prima origine e ultima destinazione in corrispondenza del luogo di residenza. L'approccio sequenziale permette di simulare le decisioni dell'utente separatamente per ciascun spostamento tenendo tuttavia conto delle scelte effettuate negli spostamenti a monte. Il modello proposto, addestrato utilizzando estese serie storiche di dati di viaggio osservati, permette di riprodurre variazioni nel programma giornaliero di viaggi di ciascun individuo in relazione alla tipologia di giornata (feriale, semifestiva e festiva) o a quanto già svolto nei giorni precedenti.

Per riprodurre le scelte di mobilità veicolare dei singoli individui il TGM utilizza più grandezze caratteristiche, in particolare: il numero giornaliero di viaggi, la distribuzione spaziale e temporale dei viaggi ed il raggio di inerzia, che descrive quanto è ampia tipicamente l'aria del territorio in cui l'automobilista si muove. Tali grandezze sono assegnate a ciascun individuo in base alle corrispondenti distribuzioni di probabilità estratte dalle sequenze di viaggi effettuati da un campione significativo di veicoli.

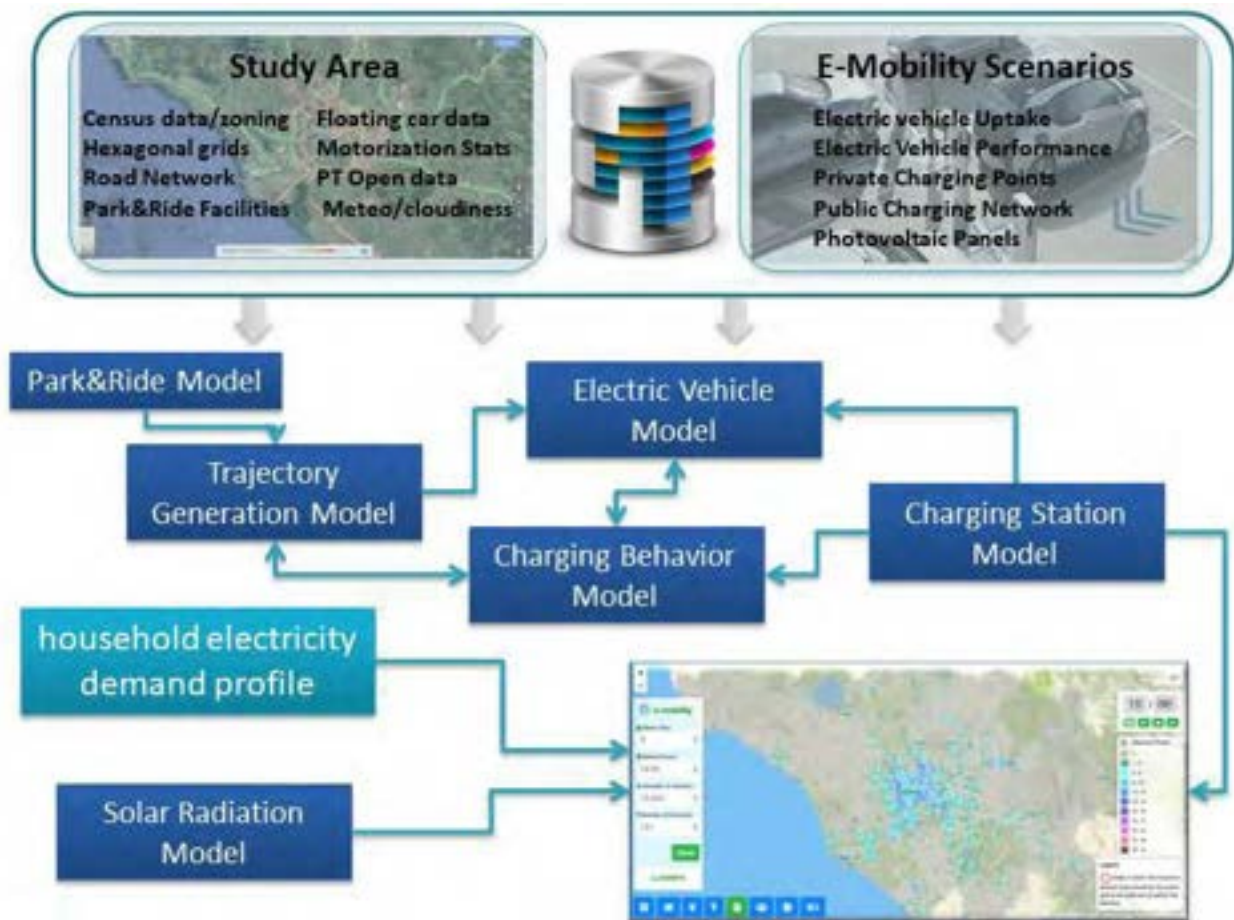


Figura 2 - Schema di calcolo della domanda di energia per la ricarica dei veicoli elettrici

Il TGM interagisce con il Park & Ride Module (PRM) ideato per riprodurre gli spostamenti multimodali e per caratterizzare la domanda di sosta nei parcheggi di interscambio con i sistemi di trasporto collettivo urbano. Il PRM consente in particolare di studiare gli effetti sui pattern di viaggio determinati da misure infrastrutturali e gestionali volte a promuovere l'uso dei parcheggi di interscambio e a scoraggiare l'accesso delle auto alle aree centrali più congestionate della città.

Il PRM stima la domanda di sosta presso i parcheggi che permettono lo scambio modalità privata – trasporto pubblico (parcheggi di Park & Ride) al variare del livello di servizio fornito dall'offerta di trasporto, dell'interazione tra domanda di spostamento ed offerta stessa, delle caratteristiche territoriali ed insediative

dell'area di studio. Il PRM fornisce in uscita la quota di domanda di Park & Ride emessa da ciascuna zona dell'area di studio per ogni intervallo temporale nell'arco della giornata.

Il PRM utilizza un algoritmo basato su una particolare tecnica di Machine Learning, denominata Random Forest. Questa tecnica di apprendimento prevede la costruzione di un insieme molto grande di alberi di regressione che "lavorano" in parallelo e che insieme cooperano al calcolo del risultato finale (ad esempio la media del risultato numerico restituito dai diversi alberi). Ciascun albero presente all'interno di una Random Forest è costruito e addestrato a partire da un sottoinsieme casuale dei dati presenti nel training set, gli alberi non utilizzano quindi il set completo, e ad ogni nodo non viene più selezionato l'attributo migliore in assoluto, ma viene scelto l'attributo migliore tra un set di attributi selezionati casualmente. Nel caso di studio di Roma, tra gli attributi presi in considerazione figurano i tempi di percorrenza in auto e con il TPL, i tempi di accesso e il riempimento dei parcheggi di scambio, l'ora della giornata e le destinazioni di uso delle zone di origine e destinazione dei viaggi.

Il TGM incorpora inoltre le procedure di calcolo delle sequenze di viaggi effettuati dai singoli autobus per tutte le linee del servizio TPL su gomma. I viaggi sono ricavati a partire dai dati open pubblicati dalle aziende del TPL riguardanti le linee, i percorsi, gli orari e le fermate che caratterizzano il servizio di trasporto collettivo locale svolto con autobus.

Il TGM interagisce con il modulo che riproduce le scelte di ricarica (Charging Behaviour Model - CBM). Il processo decisionale alla base del CBM è influenzato principalmente dallo stato di carica (SOC) della batteria, dalla successiva necessità di spostamento, dalla disponibilità di un punto di ricarica, dalla modalità di ricarica disponibile (standard, accelerata o rapida) e dalla durata della sosta.

Il SOC, definito come la percentuale della carica della batteria disponibile sul totale, è calcolato dall'Electric Vehicle Module (EVM) definito per caratterizzare la composizione e le prestazioni delle flotte dei veicoli elettrici e calcolare lo stato di carica delle batterie al termine di ogni spostamento. Il calcolo del SOC dipende dalla tipologia di veicolo, dalla lunghezza del viaggio, dalle condizioni di marcia, dalla pendenza media (per gli autobus) e dalla temperatura esterna.

Il CBM interagisce inoltre con il Charging Station Module (CSM) definito per la modellazione dell'offerta di ricarica (dislocazione sul territorio e modalità di funzionamento delle colonnine di ricarica) e la stima del carico sulla rete di distribuzione di energia elettrica in funzione della tipologia di ricarica (lenta, accelerata, veloce e ultra-veloce), della richiesta di energia dei veicoli collegati ai punti di ricarica e delle perdite legate al processo di ricarica

I modelli TGM, EVM CSM e CBM interagiscono tra loro in modo circolare influenzandosi reciprocamente. Con questo schema è possibile ad esempio rappresentare gli effetti sulle scelte di viaggio e di ricarica determinati da situazioni di over-booking delle colonnine di ricarica o di mancanza di stazioni di ricarica in prossimità dei luoghi di destinazione degli spostamenti.

Nel simulatore sono previste inoltre le procedure (Domestic Energy Module-DEM) per generare gli andamenti temporali della richiesta di energia del settore residenziale per singolo elemento della griglia con cui è stata suddivisa l'area di studio. Tali procedure consentono di valutare eventuali sovraccarichi legati alla sovrapposizione dei carichi elettrici per la mobilità e il settore domestico al variare del tempo e su scala locale, sia a livello di quartiere che di singola cella della griglia.

Le procedure sono particolarmente rilevanti nello studio di strategie di ricarica intelligente per limitare gli impatti legati alla domanda aggiuntiva per la ricarica dei veicoli elettrici e minimizzare i costi per il rinforzo della rete. Oltre ai dati censuari, riguardanti la popolazione e le abitazioni, organizzati per singola cella della griglia, l'approccio utilizza come dati di ingresso le curve di carico giornaliere ottenute in uno studio condotto da GfK Eurisko su un campione di 1200 famiglie, statisticamente significativo per numerosità e stratificazione. Le curve aggregate di carico ricavate come media delle singole curve del campione di famiglie coinvolte nell'indagine sono riferite a tre tipologie differenti di giorni (feriale, sabato e festivo) e alle quattro stagioni dell'anno.

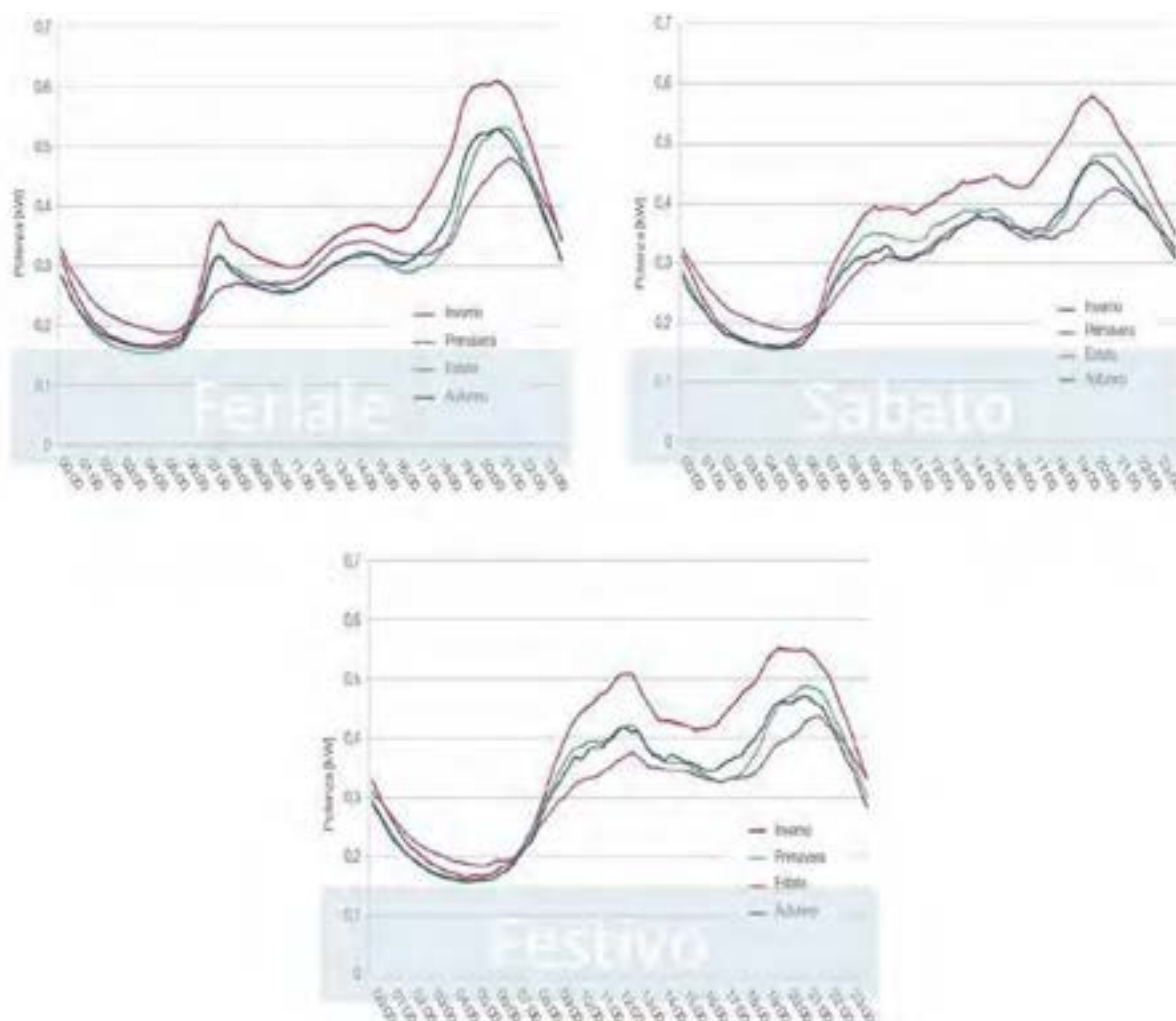


Figura 3 - Curve di carico aggregate per utenza domestica

Nel simulatore sono previsti inoltre gli algoritmi di calcolo della potenziale produzione da fotovoltaico (Photovoltaic Energy Production Module – PEPM) di ausilio allo studio e progettazione di soluzioni impiantistiche che prevedono l’uso congiunto di pannelli fotovoltaici, sistemi di accumulo e veicoli elettrici. Gli algoritmi consentono, in particolare, di studiare soluzioni che prevedono stazioni per la ricarica dotate di pannelli fotovoltaici, installati sui tetti o sulle pensiline dei parcheggi, e di sistemi di stoccaggio energetico in grado di garantire l'alimentazione dei veicoli elettrici nel corso della giornata. Il calcolo prevede la generazione su scala locale dei profili orari medi della radiazione solare e della potenziale produzione di energia in base a prefissate ipotesi di rendimento dei pannelli fotovoltaici.

I profili orari sono riferiti al giorno specifico del mese e ovviamente differiscono a seconda del mese considerato. I profili medi giornalieri sono calcolati sulla base delle serie storiche decennali di radiazione solare stimata a partire dalla copertura nuvolosa ricavata da immagini satellitari nell’area di studio.

L’ambiente di simulazione include le procedure software di post-processing per l’elaborazione, il confronto e la presentazione dei risultati delle simulazioni. Le procedure mettono in relazione i risultati delle simulazioni (mobilità, residenziale e solare) e producono informazioni sulla distribuzione spaziale, tramite mappatura su griglia, dei carichi energetici extra per effetto della sovrapposizione della domanda stimata per il comparto domestico e per la mobilità elettrica.

Le procedure software di post-processing integrano i risultati delle simulazioni per la visualizzazione della distribuzione temporale dei carichi, l’individuazione di situazioni di sovraccarico della rete di distribuzione e lo studio di efficaci strategie di smart-charging volte a favorire la ricarica delle batterie nei periodi in cui i consumi elettrici sono più bassi.

Le procedure software di post-processing elaborano i risultati delle simulazioni in corrispondenza dei parcheggi di scambio per lo studio di soluzioni che prevedono stazioni di ricarica alimentate da impianti fotovoltaici e di strategie di gestione del sistema di accumulo con le soluzioni V2G. Nel modulo sono inoltre previsti gli algoritmi per valutare le potenzialità di soluzioni di accumulo diffuso che consente di reimmettere in rete l'energia non utilizzata.

### 3 L'interfaccia utente

La realizzazione dell'interfaccia utente del Front-End si è articolata lungo un percorso composto da tre fasi, in particolare: progettazione e creazione di prototipi, test di usabilità sul prototipo sviluppato e implementazione software finale.

L'applicazione front-end è stata realizzata per permettere all'utente, tramite un editing grafico semplice ed intuitivo in modalità remota, di predisporre gli scenari di mobilità elettrica in termini di diffusione dei possessori di veicoli elettrici, composizione delle flotte e prestazioni, numero e dislocazione delle colonnine di ricarica, tipo di comportamento per la ricarica e di periodo dell'anno per la scelta dei profili di irraggiamento solare e temperatura.

L'applicazione Front-end è stata configurata anche per permettere all'utente di eseguire le simulazioni, nonché di visualizzare dati fondamentali e risultati dei processi di simulazione, sia in forma disaggregata su mappa georeferenziata attraverso una struttura a celle esagonali, sia in modalità aggregata, per mezzo di grafici e tabelle riassuntive, per una più agevole comprensione delle simulazioni effettuate.

L'interfaccia di Front-end è stata implementata utilizzando interamente il linguaggio javascript, secondo gli standard HTML5, integrato con librerie JQUERY.

Per accedere al front-end da postazione remota basta collegarsi al seguente indirizzo web: <http://whatif.cslparis.com/e-mobility/>. Una volta collegati appare la finestra principale che permette un accesso facilitato alle principali funzionalità del simulatore, in particolare: alla predisposizione degli scenari, all'esecuzione delle simulazioni e alla visualizzazione di informazioni sullo specifico contesto di applicazione e dei risultati delle simulazioni.

La finestra principale (Figura 4) è composta da quattro sezioni principali: l'area di mappa, il pannello Scenari con i comandi di impostazione e caricamento degli scenari, la barra strumenti che contiene i comandi per la visualizzazione dei dati e dei risultati e il pannello di riproduzione dinamica dei risultati delle simulazione nell'arco delle 24 ore.

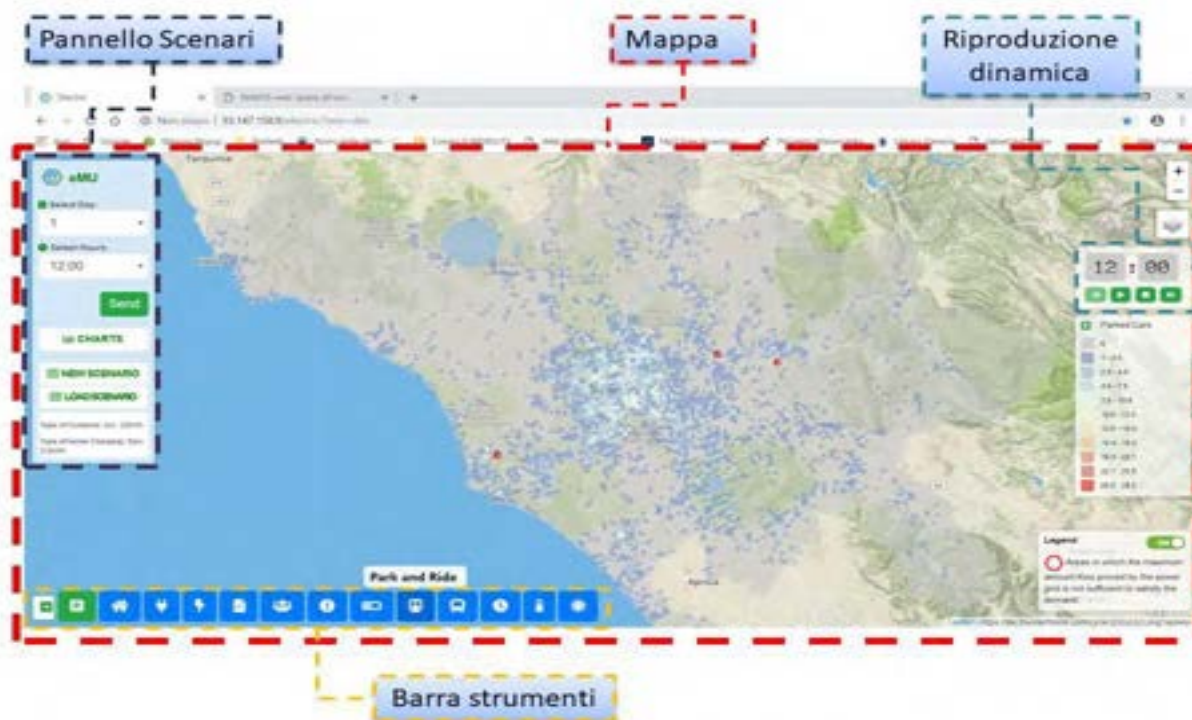


Figura 4 - Struttura della finestra principale

L'area di Mappa, posizionata inizialmente sull'ambito territoriale di applicazione, include due layer sovrapposti. Il primo layer che fa da sfondo è costituito dalla cartina geografica fisica con la rete stradale ben

evidenziata e con una quantità di dettagli sempre maggiore all'aumentare del livello di Zoom. Il secondo layer, posto in primo piano, è costituito da una griglia di esagoni regolari che ricopre l'intera area di applicazione. Nel caso dell'area metropolitana di Roma, la griglia, che ha un'estensione corrispondente al territorio provinciale, è formata da 17349 esagoni. La distanza tra i centri di due esagoni adiacenti è pari a 700 metri. Cliccando su un singolo esagono è possibile visualizzare i dati e i risultati delle simulazioni associate alla porzione di territorio rappresentata dalla cella stessa.

Il pannello "Scenari", visualizzato nel lato sinistro della finestra principale, include i pulsanti per impostare ed eseguire gli scenari da simulare e per caricare gli scenari già simulati per la visualizzazione dei risultati e per la visualizzazione. In particolare, per la configurazione degli scenari occorre cliccare sul pulsante "New Scenario" che fa comparire un form di scelta dei parametri di simulazione (Figura 5).

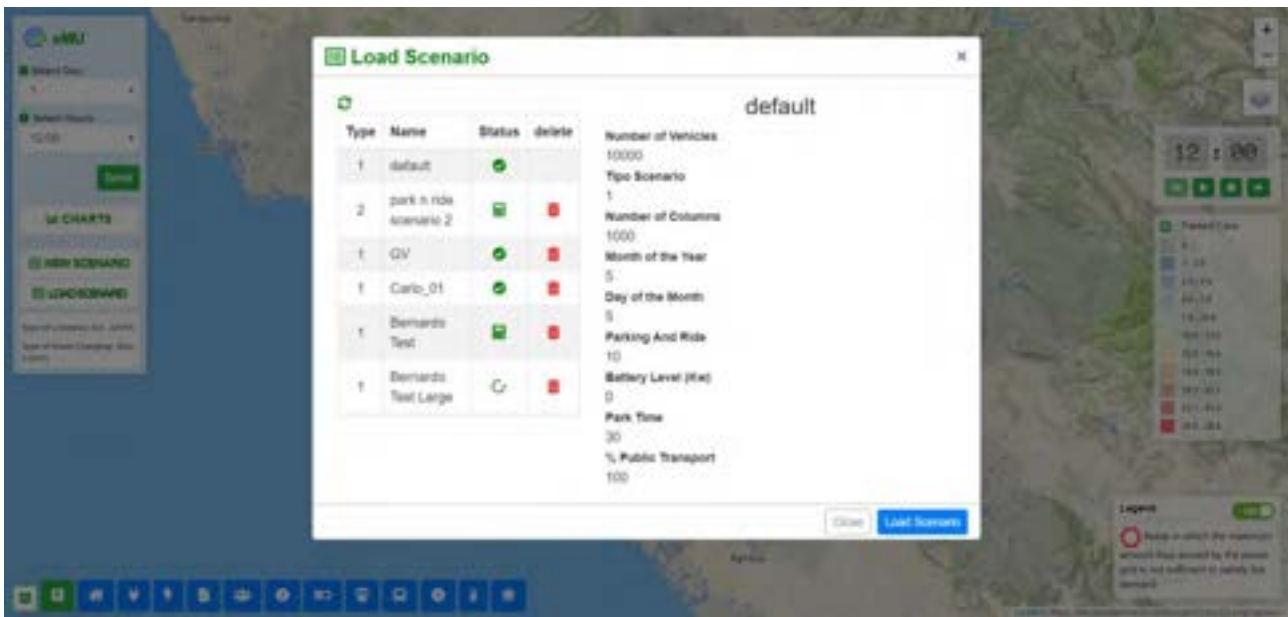
Questi parametri ricalcano fedelmente tutti gli elementi richiesti alle simulazioni in input:

- Numero veicoli
- Numero di colonnine
- Mese e giorno dell'anno
- Tipo di Scenario Park'n'Ride (con parametri diversi a seconda dei casi)
- Stato di carica della batteria sotto il quale si ricarica
- Tempo di sosta minimo sopra al quale si ricarica
- Percentuale di route di trasporto pubblico elettrificate

**Figura 5 - Esempio di form di inserimento dei parametri di simulazione**

Una volta inseriti i parametri, questi vengono gestiti dal backend che li mette in una coda di simulazioni da eseguire. Una volta che lo scenario è stato calcolato, i risultati sono visualizzabili cliccando sul comando "Load Scenario" che visualizza il set di scenari simulati (con un tic verde accanto) e ancora in fase di simulazione (con una calcolatrice accanto).

Si veda la Figura 6 di esempio della tabella di caricamento scenari.











**Figura 6 - Tabella di caricamento scenari. Gli scenari col tic verde accanto sono già stati calcolati. Gli altri sono o appena stati inseriti (cerchio) o in fase di computazione (calcolatrice)**

La Barra Strumenti, situata in basso a sinistra della finestra principale, facilita l’interazione dell’utente con l’ambiente di simulazione, in particolare per la selezione e visualizzazione dei dati di ingresso e dei risultati della simulazione.

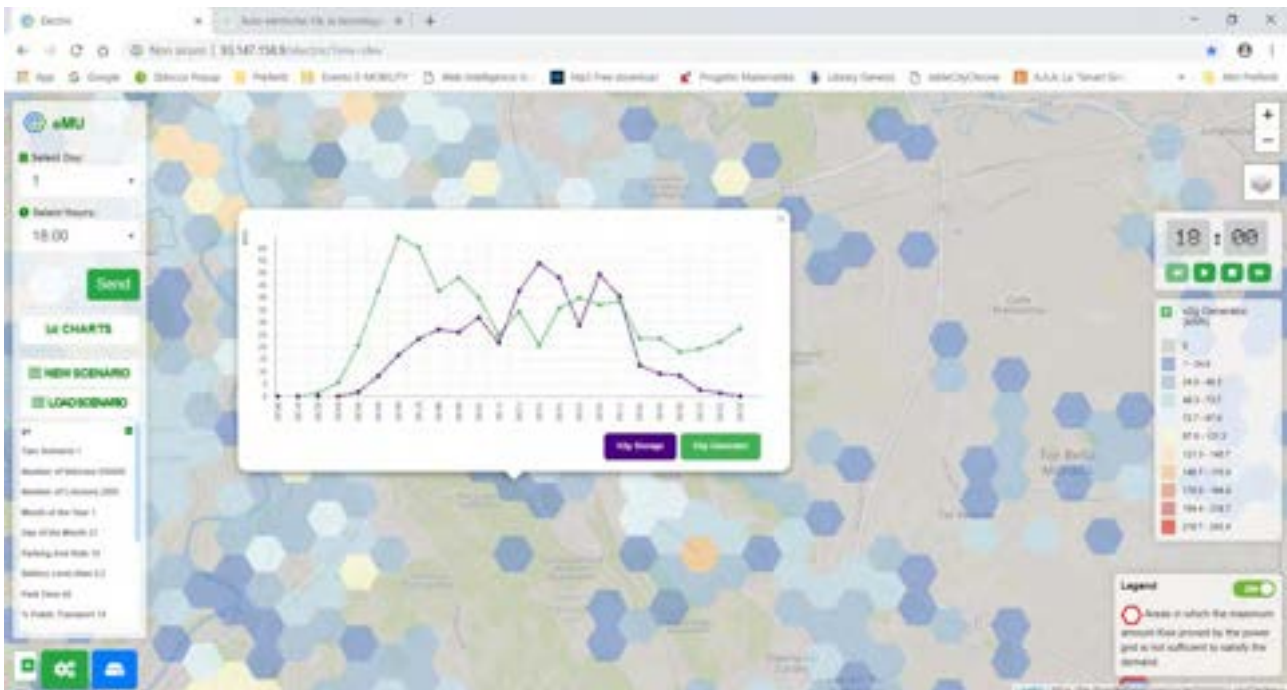
Le grandezze scelte per la visualizzazione sono ottenute aggregando dati di ingresso e risultati delle simulazioni per singolo esagono della griglia. La visualizzazione viene effettuata in due modalità. La prima modalità presenta i risultati su mappa sfruttando una gradazione di colori tra il valore massimo e minimo calcolato su ciascuna cella per una prefissata ora del giorno. La seconda viene attivata cliccando sulla specifica cella e consente di visualizzare i profili orari relativi al giorno di simulazione delle grandezze calcolate come ad esempio la serie temporale dei consumi di energia elettrica.

Le grandezze che possono essere scelte cliccando sui singoli pulsanti della Barra degli strumenti sono:

	Numero di auto parcheggiate in una data ora di una giornata
	Energia elettrica richiesta dalle auto nei punti di ricarica domestica
	Energia elettrica richiesta dalla auto in ricarica presso le colonnine pubbliche
	Numero di colonnine di ricarica pubblica
	Energia elettrica totale
	Popolazione residente
	Percentuale di ricariche non effettuate per offerta insufficiente

	Consumi elettrici domestici
	Percentuale del flusso veicolare destinato ai parcheggi di interscambio
	Energia elettrica richiesta ai capolinea delle linee TPL con autobus elettrici
	Variazione dei tempi di accesso
	Temperatura
	Radiazione Solare
	Energia disponibile nelle batterie delle auto in sosta per servizi di rete (Tecnologia V2G)
	Accumulo disponibile nelle batterie delle auto in sosta (Tecnologia V2G)

Una volta selezionati i pulsanti per il V2G è possibile visualizzare, cliccando sulla singola cella, i profili orari dei flussi di energia in accumulo o per servizi ausiliari di rete (Figura 7).



**Figura 7 - Profili dei potenziali flussi di energia per applicazioni V2G**

L'utente può selezionare e visualizzare questi dati ad un certo momento della giornata (ora / giorno di simulazione), come mostrato in Figura 8.

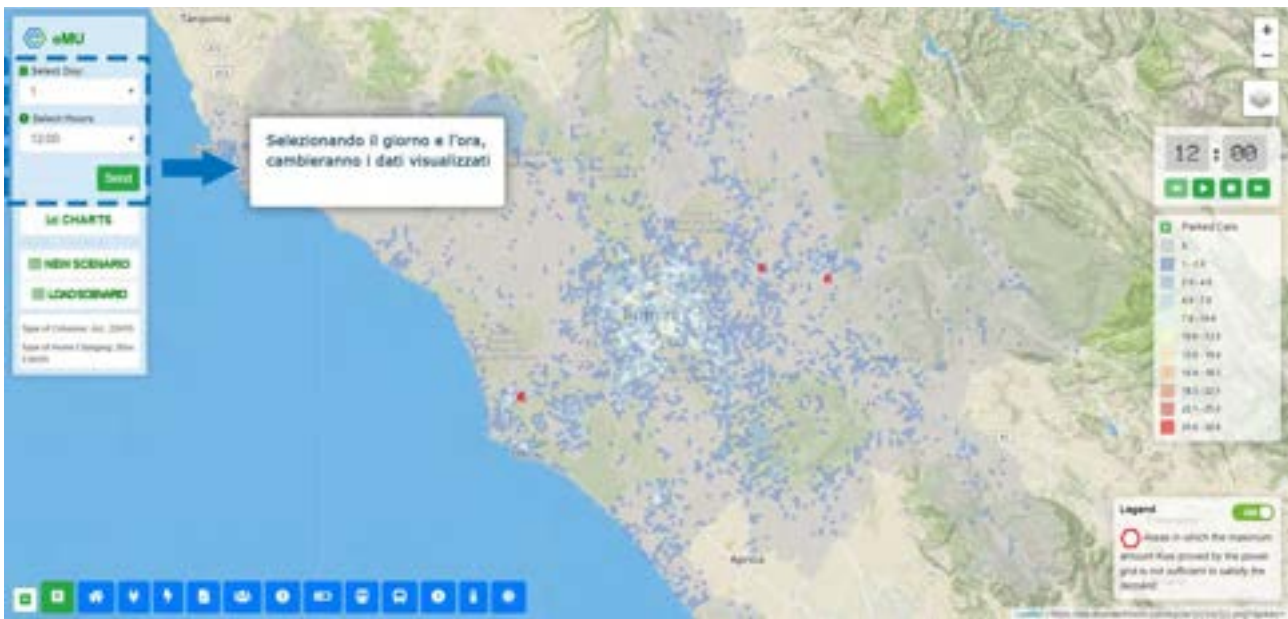


Figura 8 - Esempio di selezione giorno/ora di visualizzazione dei dati di output

Infine il Pannello “Riproduzione dinamica”, situato in alto a destra della finestra principale consente di impostare e avviare l’animazione delle 24 ore del giorno selezionato dei risultati delle simulazioni su mappa, (Figura 9)



Figura 9 - Esempio di selezione modalità step-by-step

La visualizzazione dei dati temporale in alcuni casi è possibile anche senza dover animare la mappa. In particolare se si è interessati alle curve di consumo elettrico è sufficiente cliccare su un esagono per ottenere la corrispondente serie temporale dei consumi (Figura 10). Una soglia di massima potenza erogabile è stata ottenuta considerando 3.5kW di energia oraria massima per ogni abitazione presente nell’area nel caso di ricarica domestica. Questa è visualizzata come una linea tratteggiata rossa e, ogni qual volta in un esagono questa viene superata, l’esagono è contornato di rosso in maniera da evidenziare la presenza di una criticità.

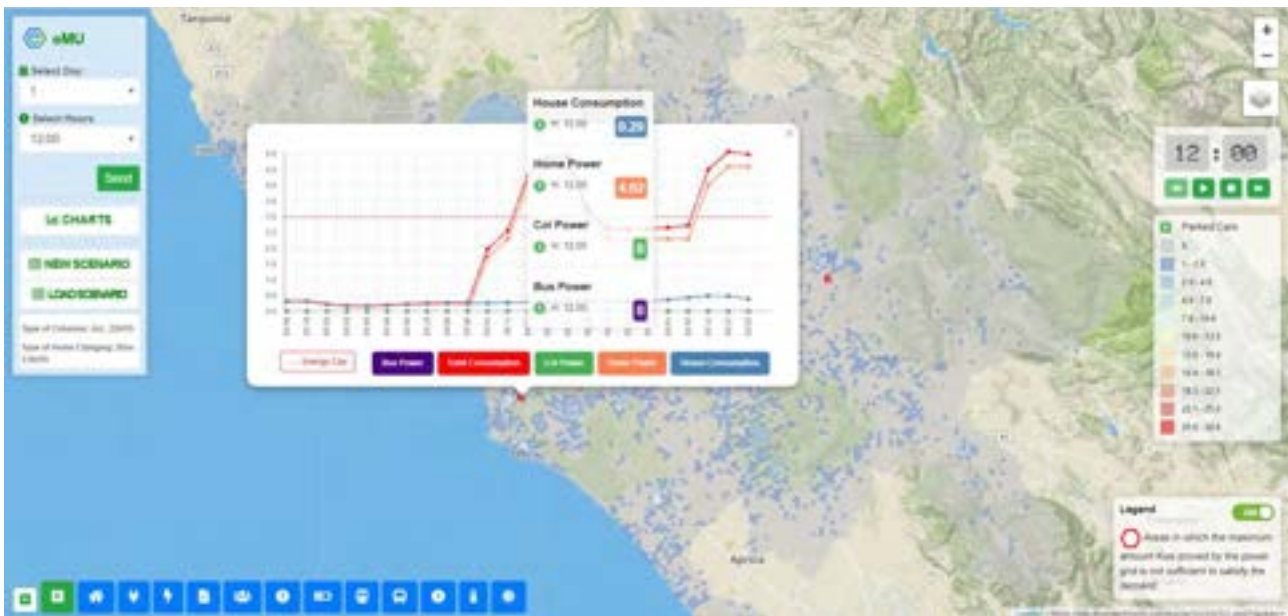


Figura 10 - Esempio di serie temporale dei consumi.

Altre serie temporali visualizzabili si ottengono cliccando su uno dei due layer vehicle2grid, nel qual caso le serie temporali dei consumi sono sostituite da quelle v2g Generator e v2g Storage.

Infine, è possibile visualizzare alcune grafici riassuntivi della simulazione nella finestra “charts” (Figura 11). A titolo esemplificativo sono stati inseriti grafici relativi alla percentuale orarie di ricariche mancate, al numero di kW ecceduti a causa di consumi troppo alti, al consumo totale orario di kW di energia elettrica e al numero orario di spostamenti.



Figura 11 - Esempio di grafici riassuntivi della finestra “Charts”

La visualizzazione dei dati nella piattaforma può essere effettuata una volta concluso l’intero processo di calcolo svolto nella parte backend del simulatore. Nel caso di Roma questo processo non è istantaneo a causa del costo computazionale, ma raramente eccede l’ora come tempo di attesa.

## 4 Validazione e sperimentazione

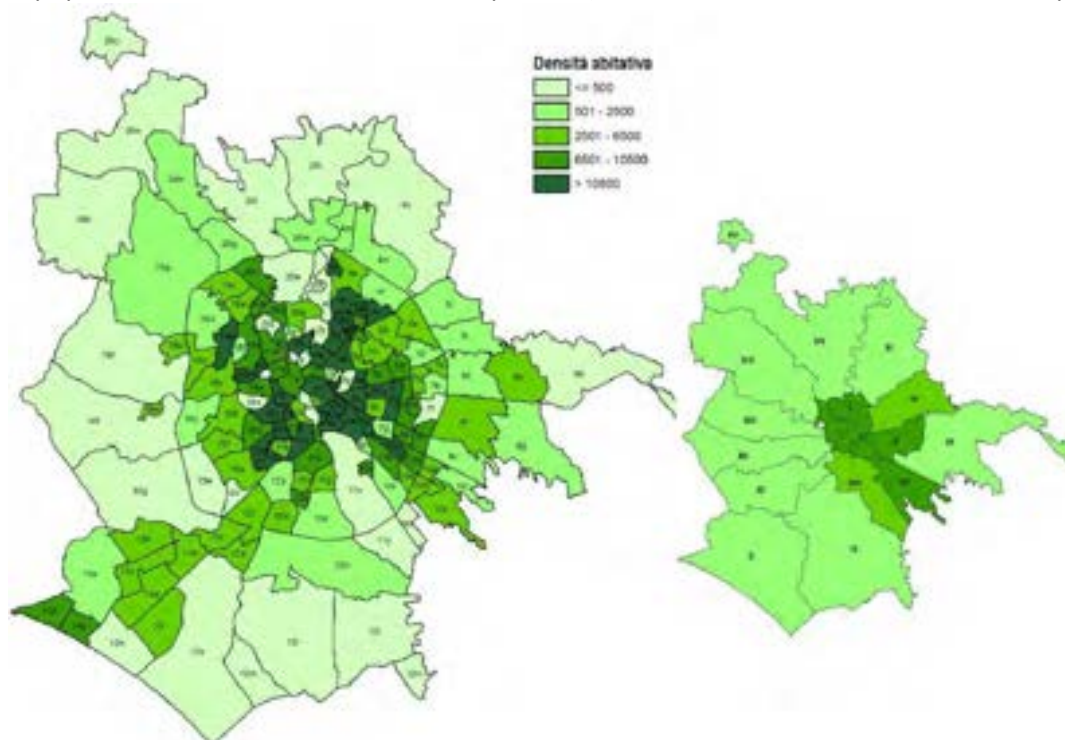
Nel corso del secondo anno di attività alla fase di integrazione del prototipo è seguita la fase di calibrazione e test con applicazione ad un caso reale. L'attività di test, articolata nelle due sotto-attività di test dei singoli moduli e del sistema integrato ha permesso, in particolare, di verificare il raggiungimento dei requisiti stabiliti e la correttezza funzionale rispetto alle specifiche.

L'ambiente software, verificato e testato assumendo come caso di studio il territorio della città metropolitana di Roma, ha consentito di analizzare le variazioni nella distribuzione spaziale e temporale della domanda di energia elettrica conseguenti a diverse ipotesi di diffusione dei veicoli elettrici, di configurazione dei punti di ricarica e di comportamento dei singoli individui.

### 4.1 Il caso di studio della città metropolitana di Roma

L'odierna area metropolitana di Roma è caratterizzata da un tessuto insediativo prevalentemente frammentato nelle aree periferiche che si sono sviluppate negli ultimi sessant'anni, da un fitto reticolo di servizi differenziati, variamente distribuiti sul territorio, e da un consistente fenomeno di pendolarismo (per lavoro e studio) dai Comuni di hinterland e dalle aree più periferiche verso le aree più centrali.

Il territorio della città metropolitana di Roma coincide con quello della Provincia di Roma, che comprende 121 Comuni, ivi compresa Roma Capitale. La città metropolitana di Roma contava nel 2016 circa 4,35 milioni di abitanti e poco meno di 1,99 milioni di famiglie con una media di componenti per famiglia pari a 2,17. L'area metropolitana di Roma è vasta 5.352 chilometri quadrati a cui corrisponde una densità demografica di 812 abitanti per chilometro. Nel 2016 il Comune di Roma contava circa 2.87 milioni di abitanti (circa il 66% dell'intera popolazione residente nell'area metropolitana) con una densità di circa 2230 abitanti per km<sup>2</sup>.



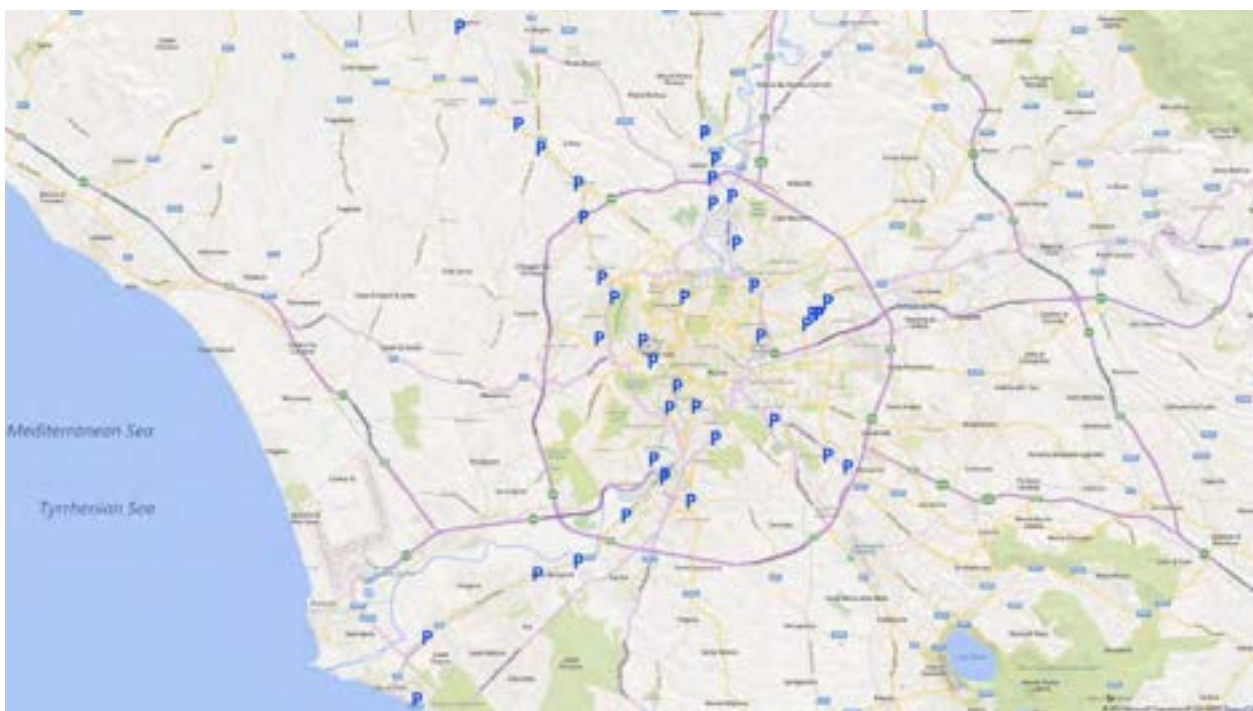
**Figura 12 - Densità abitativa (abitanti/kmq) per zona urbanistica e Municipio di Roma**  
Fonte: Elaborazioni Ufficio di Statistica di Roma

Il parco auto circolanti nella Capitale era costituito nel 2016 da circa 1,760 milioni di autovetture. Esse rappresentavano circa il 65,5% delle autovetture in circolazione nell'intera area metropolitana (circa 2,683 milioni) con una densità di 1.369 auto per Km<sup>2</sup>.

L'area metropolitana di Roma presenta inoltre una forte prevalenza dell'auto privata negli spostamenti, intorno al 65% nella fascia oraria di punta, e una sempre più elevata frequenza di superamento dei limiti di legge della qualità dell'aria imputabile prevalentemente al traffico veicolare.

Sul fronte del TPL, l'offerta di trasporto pubblico su ferro, che comprende 4 linee metro e 6 linee tramviarie per una lunghezza complessiva rispettivamente di 58 e 37 km, è piuttosto limitata se posta a confronto con le maggiori città europee. Diversamente la rete di trasporto pubblico di superficie, che assorbe circa il 76% degli spostamenti su mezzi collettivi, risulta essere tra le più estese in Europa con circa 350 linee per una lunghezza complessiva di 3000 km. Infine la produzione totale programmata per il servizio autobus ammonta a circa 130 milioni di vetture-km all'anno.

La rete dei parcheggi di scambio sul territorio del Comune di Roma è costituita da 40 aree di parcheggio con un'offerta totale di 12000 stalli. Gran parte dei parcheggi di scambio sono situati in prossimità delle stazioni della linea A e B della metropolitana e, in misura minoritaria, in aree limitrofe alle stazioni delle linee ferroviarie concesse e regionali.



**Figura 13 - Dislocazione dei parcheggi di scambio a Roma**

#### **4.2 Il Charging Station Module**

Uno dei fattori abilitanti la mobilità elettrica è la rete dei punti di ricarica. La dislocazione sul territorio delle postazioni di ricarica deve assicurare una buona copertura e servire i principali poli generatori e attrattori dei flussi di traffico della città. Oltre alla dislocazione, anche il dimensionamento e le modalità di gestione dei servizi di ricarica di un'area urbana giocano un ruolo rilevante nell'influenzare il comportamento degli utenti nelle scelte di ricarica.

Come già descritto precedentemente l'ambiente di simulazione incorpora il Charging Stations Module (CSM), ideato per la modellazione dell'offerta di ricarica privata e pubblica (dislocazione sul territorio e modalità di funzionamento delle colonnine di ricarica) e la stima del carico sulla rete di distribuzione di energia elettrica in funzione della tipologia di ricarica (lenta, accelerata, veloce e ultra-veloce).

La dislocazione sul territorio e la configurazione dei punti di ricarica può essere fornita direttamente in input al modulo come scenario di progetto per verificare, tramite simulazione, la compatibilità dell'offerta di ricarica con la domanda potenziale stimata nell'area oggetto di studio.

In alternativa, una volta stabilito un certo numero di punti di ricarica pubblici e privati, il modulo utilizza un algoritmo di assegnazione alle diverse zone dell'area di studio. La localizzazione dei punti di ricarica è stabilita in base sia alla distribuzione territoriale dei diversi poli di generazione ed attrazione dei flussi di traffico, che alla durata media delle soste.

L'algoritmo identifica i diversi poli di generazione e attrazione utilizzando come dati di ingresso le elaborazioni del modulo TGM che, come descritto precedentemente, riproduce l'intera sequenza di spostamenti e soste per ogni singolo veicolo circolante nell'area di studio nell'arco temporale di un giorno, una settimana o un mese. L'algoritmo fornisce infine il numero di colonnine e il relativo modo di ricarica per ciascuna cella esagonale con cui è stata suddivisa l'area di applicazione.

Nella Tabella 1 sono riportati infine le differenti tipologie di ricarica individuate per la rappresentazione dell'offerta di ricarica all'interno dell'ambiente di simulazione. Ciascuna tipologia è descritta in base alle caratteristiche tecniche e funzionali, nonché ai diversi ambiti di applicazione.

Tra le caratteristiche tecniche figura l'efficienza di ricarica per tener conto delle perdite di energia che si verificano durante la fase di ricarica includendo sia le perdite di conversione del caricabatteria che può essere a bordo del veicolo o esterno nella colonnina, sia le perdite che si verificano all'interno della batteria.

Va ricordato che il caricabatteria a bordo veicolo determina la potenza massima accettata dal veicolo e ogni auto elettrica ha un caricabatteria a bordo con caratteristiche diverse. Alcuni veicoli elettrici ricaricano massimo a 3,7 kW sulle colonnine in corrente alternata, anche se la colonnina è da 22 kW.

Le perdite aumentano anche quando il caricabatteria esterno nella colonnina lavora ad una potenza inferiore a quella nominale.

**Tabella 1 - Tipologie di ricarica e attributi delle colonnine di ricarica**

Attributi	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6
Velocità di ricarica	Lenta	Lenta	Accelerata	Veloce	Ultra Veloce	Ultra Veloce
Potenza	3,5 kW	7,4 kW	22 kW	50kW	150kW	250kW
Tipo Corrente	CA	CA	CA Trifase	CC	CC	CC
Tensione/Corrente	230V/16A	230V/32A	400V/32A	500V/120A	500V/300A	800V/300A
Normativa	Modo 1-2	Modo 2	Modo 2-3	Modo 4	Modo 4	Modo 4
Tipo di Veicoli	Auto	Auto, Furgoni	Auto, Furgoni	Auto, Furgoni	Auto, Furgoni	Autobus
Ambito di Applicaz.ne	Privato	Privato Pubblico	Pubblico	Pubblico	Pubblico	Privato
Tempi di ricarica	6-8 ore	3-4 ore	1-2 ore	20-30 minuti	10 minuti	10 minuti (ricarica parziale)
Efficienza di ricarica	83.6%	85.0%	89.5%	87.2%	86.2%	85.2%

L'interazione dinamica della domanda di energia, legata all'uso dei singoli veicoli, con l'offerta di ricarica, rappresentata dalle differenti tipologie di impianti di ricarica presenti sul territorio, consentirà di riprodurre l'evoluzione spaziale e temporale della quantità di veicoli elettrici in ricarica, della potenza assorbita da ciascun veicolo e del carico addizionale sulla rete in funzione dei valori di efficienza di ricarica che si attestano tra l'83 e l'89% in base alla modalità di ricarica.

#### 4.3 L'Electric Vehicle Module (EVM)

L'Electric Vehicle Module (EVM) calcola lo stato di carica (SOC) della batterie al termine di ogni spostamento in base alla tipologia di veicolo, alla lunghezza del viaggio, alle condizioni di marcia, alla pendenza media (solo per gli autobus) e alle condizioni climatiche che si possono manifestare nel corso dell'anno nell'area di studio.

Per la tipologia del veicolo si è preso come riferimento la classificazione adottata dalla Commissione Europea che distingue i diversi tipi di autoveicoli in base alle dimensioni, al volume e al numero di passeggeri trasportabili. I principali segmenti automobilistici europei sono sei e vanno dalla lettera A alla lettera F, in particolare si hanno rispettivamente : mini cars (city car), small cars (utilitarie), medium cars (berline compatte), large cars (berline di medio-grandi dimensioni), executive cars (berline di grandi dimensioni e con carrozzeria tre volumi) e luxury cars (lussuose berline di grandi dimensioni).

Nella Tabella 2 sono riportati i segmenti utilizzati per la rappresentazione del parco auto elettriche all'interno del modulo EVM. A ciascun segmento sono associati gli attributi di riferimento per il calcolo dei consumi, in particolare: la capacità della batteria in kWh, la compatibilità con la modalità di ricarica e il consumo medio. I valori riportati per ciascun segmento riflettono le caratteristiche e le prestazioni dei più recenti modelli di auto elettrica prodotti dalle case automobilistiche. Tali valori possono essere modificati dall'utente in fase di impostazione degli scenari per tener conto degli attesi miglioramenti tecnologici delle auto elettriche del futuro.

**Tabella 2 - Tipologie di auto elettriche e attributi**

Tipo	Segmento	Capacità Batteria (kWh)	Ricarica Lenta/accelerata	Ricarica Veloce	Ricarica Ultra Veloce	EC (Wh/km)
BEV	A	20	✓	✓		130
	B	25	✓	✓		150
	C	30	✓	✓	✓	160
	D	70	✓	✓	✓	180
	E	90	✓	✓	✓	200
PHEV	B	8	✓			150
	C	10	✓			160
	D	12	✓			180
	E	12	✓			200

Un importante parametro di input per la rappresentazione del parco auto elettriche nel modello di calcolo è la quota percentuale di ciascun segmento auto. Per la scelta delle quote percentuali si possono prendere come riferimento i recenti trend del mercato italiano delle autovetture riportati in Figura 14.

Diversamente, per la rappresentazione della flotta di autobus elettrici impegnati sulle linee del TPL si considerano 4 segmenti che si rifanno principalmente alle dimensioni. In particolare: il Segmento 1 per i mini (6 metri, 30 passeggeri), Segmento 2 per i midi (9 metri, 75 passeggeri), Segmento 3 per gli standard (12 metri, 100 passeggeri) ed infine Segmento 4 per gli articolati (16 metri, 150 passeggeri).

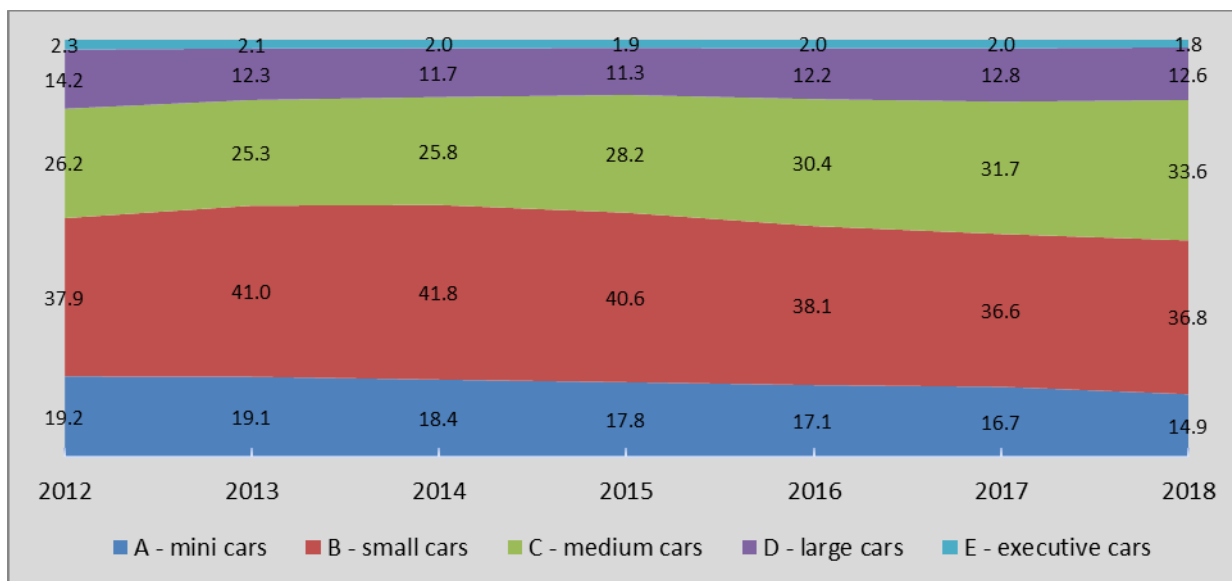


Figura 14 - Evoluzione del mercato italiano delle automobili per segmento - Quote% (Fonte UNRAE)

In fase di scarica, il calcolo del SOC dipende dall’energia erogata dalla batteria per effettuare il viaggio, dal rendimento in scarica della batteria e dalla sua capacità massima di accumulo.

In fase di carica, il SOC è calcolato in base alla potenza di carica, resa disponibile dalla colonnina di ricarica o dal caricabatteria a bordo del veicolo al netto delle perdite di conversione, e alla durata della ricarica stessa.

Tornando alla fase di scarica, il calcolo del consumo è soggetto a differenze notevoli poiché, come per le auto con motore tradizionale, i consumi variano in base allo stile di guida, alle condizioni di marcia, al profilo altimetrico del percorso affrontato, all’incisività della frenata rigenerativa, all’uso degli optional di bordo e al peso che deve trasportare la vettura.

In più, nel caso delle auto elettriche, entra in gioco anche la temperatura esterna. Il consumo extra alle temperature estreme è prevalentemente correlato all’uso dei dispositivi di riscaldamento o raffreddamento dell’abitacolo. In modo non prevalente il consumo extra alle basse temperature è dovuto anche all’uso dei lunotti termici per lo sbrinamento dei vetri e ai rendimenti più bassi dei componenti del powertrain. Infine consumi extra si hanno per il sistema di mantenimento della temperatura ottimale di esercizio della batteria che, come è noto, funziona con prestazioni ridotte alle temperature estreme, siano esse troppo calde o troppo fredde.

Il modulo di calcolo del SOC implementato nel simulatore, sia per le auto che per gli autobus, incorpora tutte le funzioni già ampiamente descritte nel rapporto tecnico relativo al PAR 2016<sup>1</sup>.

Tali funzioni sono state implementate nel simulatore e, successivamente, testate per valutare la correttezza del calcolo nelle diverse condizioni di marcia dei veicoli e situazioni climatiche. A titolo di esempio in Figura 15 sono riportate le stime dei consumi specifici associati ai viaggi simulati per ciascun segmento auto nelle prime due settimane di Gennaio. In questo periodo dell’anno i valori medi di temperatura dell’aria, elaborati dal Solar Radiation Module per l’area metropolitana di Roma, oscillano tra i 2°C e i 19 °C. Alle temperature più basse l’extra charge stimato si attesta intorno al 14%, in linea con l’output atteso.

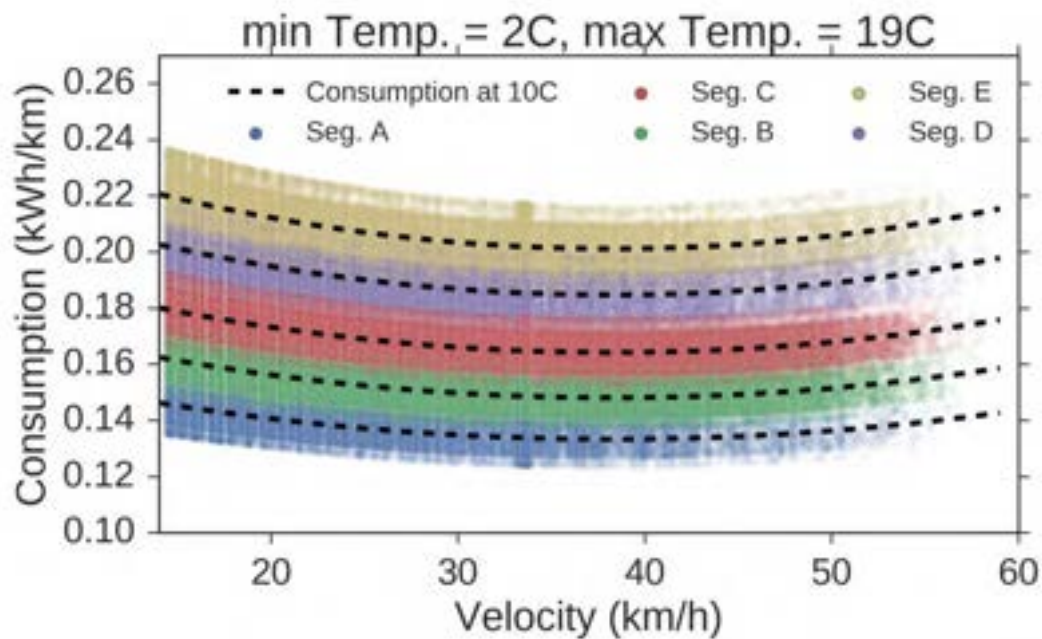


Figura 15 - Risultati del test di simulazione delle curve di consumo (mese di Gennaio)

#### 4.4 Il Solar Radiation Module (SRM)

Le stime della radiazione solare e della temperatura dell'aria, nonché il loro andamento medio stagionale e la loro variabilità meteorologica, sono elementi importanti per poter caratterizzare i flussi energetici di soluzioni impiantistiche di ricarica con pannelli fotovoltaici.

Nella precedente annualità della ricerca di sistema, per poter apprezzare il contributo che la radiazione solare può apportare al fabbisogno energetico della mobilità elettrica, l'area della città di Roma e dei suoi dintorni — in larga parte coincidente con la perimetrazione amministrativa della città metropolitana — è stata 'mappata' sotto il profilo del potenziale radiativo annuale al suolo<sup>1</sup>. La fonte dei dati utilizzata è il corposo archivio ENEA delle stime della radiazione solare per la regione italiana, ottenute a partire dalle immagini satellitari di copertura nuvolosa<sup>2,3</sup>, che abbracciano attualmente gli anni dal 2006 al 2017, con frequenza più che oraria (precisamente: ogni quarto d'ora).

I valori riscontrati dell'irradiazione globale orizzontale, fra 1550 e 1630  $kWh/m^2$  per l'area di Roma, hanno consentito di effettuare un esercizio progettuale per un impianto di produzione fotovoltaico da abbinare ad una stazione di ricarica dei veicoli elettrici, con la duplice possibilità d'indirizzare la produzione di energia sia verso il sistema di accumulo previsto in stazione, sia, se conveniente o necessario, verso la rete elettrica.

E' stato mostrato anche l'andamento giornaliero della radiazione al suolo nell'arco di un anno e la sua variabilità inter-annuale, per una singola località, Acilia (Roma). A questo fine, lo strumento di calcolo individuato è l'*anno meteorologico statistico*.

<sup>1</sup> G. Valenti, C. Liberto, G. Messina, e F. Spinelli (2017), Caratteristiche e funzionalità del simulatore di scenari urbani di mobilità elettrica, Rapporto ENEA - Ricerca di Sistema Elettrico, Roma, settembre 2017, RdS/PAR2016/234.

<sup>2</sup> S. Petrarca, E. Cogliani e F. Spinelli (2000), La radiazione solare globale al suolo in Italia. Anni 1998 e 1999 e media 1994-1999, ENEA, Roma. ISBN 88-8286-055-8.

<sup>3</sup> F. Spinelli, E. Cogliani, A. Maccari e M. Milone (2007), La misura e la stima della radiazione solare: l'archivio dell'ENEA e il sito Internet dell'Atlante italiano della radiazione solare per la pubblicazione dei dati, Rapporto tecnico ENEA SOL/RS/2007/21, Roma.

URL: <http://www.solaritaly.enea.it/Documentazione/Archivio%20Radiazione%20e%20Solaritaly.pdf>

Sulla scorta del lavoro preparatorio appena descritto, nella presente annualità sono stati elaborati gli anni statistici per 11 località e poi confezionati secondo il formato di input appropriato per l'uso nel simulatore. L'elenco delle località con le rispettive coordinate geografiche è mostrato in Tabella 3. La posizione di ciascuna località è stata scelta in modo da coprire con sufficientemente uniformità l'area geografica studiata (tre di esse sono situate all'interno del grande raccordo anulare di Roma).

**Tabella 3 - Località per le quali è stato ricavato l'anno statistico meteorologico**

Codice	Località	Latitudine (in gradi ° Nord)	Longitudine (in gradi ° Est rispetto a Greenwich)
CE/013	Ardea	41.5964	12.5403
CE/052	Monte Porzio Catone	41.7300	12.7155
CE/056	Ostia Lido	41.7468	12.2940
CE/081	GRA - Anagnina	41.8315	12.5915
CE/087	Corviale	41.8535	12.4100
CE/095	Testaccio	41.8808	12.4691
CE/111	GRA - Tiburtina	41.9354	12.5876
CE/117	Ottavia	41.9574	12.4058
CE/122	Aurelia c/o Ladispoli- Cerveteri	41.9762	12.1033
CE/127	Tivoli	41.9898	12.7062
CE/146	Casaccia	42.0585	12.2808

La radiazione solare al suolo — precisamente: l'irradianza solare globale orizzontale (*Global Horizontal Irradiance*, GHI) — non è la sola grandezza tabellata nell'anno statistico. E' stata aggiunta infatti anche la temperatura dell'aria in quanto quest'ultima ha un'influenza non trascurabile sulle prestazioni delle batterie con cui le auto sono equipaggiate. Come subito vedremo, a ciascuna grandezza è associato un valore medio e un indice di variabilità.

Un anno statistico è costituito da 8760 record orari — tanti sono infatti le ore presenti in un anno — allestiti nel modo che segue.

Si costruisce la serie pluriennale dei dati orari relativi alla grandezza e alla località di interesse, a partire dal database che, per la GHI, come si è detto, è costituito dalle stime ENEA che coprono l'intero arco temporale dal 2006 al 2017; e per ogni ora dell'anno si calcolano il valor medio e lo scarto quadratico medio con i dati, tanti quanti sono gli anni presenti, riferiti ad essa. In formule:

- per la media:

$$\bar{I}_{gh} = \frac{\sum_{a=2006}^{2017} I_{agh}}{12} \quad (1)$$

in cui:  $I_{agh}$  è l'irradianza globale orizzontale riferita all'anno  $a \in 2006 \div 2017$ , al giorno dell'anno  $g \in 1 \div 365$  e all'ora del giorno  $h \in 0 \div 23$ ;  $\bar{I}_{gh}$  è invece il valore calcolato dell'irradianza media per il giorno dell'anno  $g$  e l'ora del giorno  $h$ .

- per lo scarto quadratico medio (sqm):

$$sqm(I_{gh}) = \sqrt{\frac{\sum_{a=2006}^{2017} (I_{agh} - \bar{I}_{gh})^2}{12}} \quad (2)$$

(Lo sqm è il parametro che si è deciso di utilizzare nell'anno statistico per caratterizzare la variabilità meteorologica dell'irradianza).

Nelle formule precedenti,  $g$  è propriamente il *giorno giuliano* e, per definizione, è il numero progressivo che etichetta i giorni dell'anno. Esso vale :

giorno	giorno giuliano
<b>1° gennaio</b>	1
<b>2 gennaio</b>	2
•••	
<b>30 gennaio</b>	30
<b>31 gennaio</b>	31
<b>1° febbraio</b>	32
<b>2 febbraio</b>	33
•••	
<b>30 dicembre</b>	354
<b>31 dicembre</b>	355

e si rivela utile per i software di simulazione dei dati meteo climatici.

A questo punto s'impongono due precisazioni essenziali. La prima è che per aumentare la base statistica, la media e lo sqm relativi a un dato giorno  $g$  e una data ora  $h$  sono stati calcolati utilizzando in realtà i dati (sempre della stessa ora  $h$ ) dei 5 giorni consecutivi centrati su  $g$  (e non quelli del solo giorno  $g$ ). Così ad esempio, per la media, la formula usata al posto della (1) è la seguente:

$$\bar{I}_{gh} = \frac{\sum_{a=2006}^{2017} \left( \sum_{j=g-2}^{g+2} I_{ajh} \right)}{60} \quad (3)$$

e una formula simile è stata usata per lo sqm.

La scelta di ricorrere alle irradianze di più giorni consecutivi per una stessa ora, piuttosto che a quelle di più ore consecutive nello stesso giorno, è dettata dall'esigenza di non pregiudicare l'indipendenza a fini statistici dei dati di partenza. È ovvio infatti che le irradianze misurate alla stessa ora in due giorni consecutivi sono più scorrelate rispetto a quelle misurate in due ore consecutive dello stesso giorno.

Riguardo alla seconda precisazione, occorre aggiungere che per ogni località sono stati allestiti due anni statistici: il primo, a cui si è fatto riferimento nelle righe precedenti, scandito con passo temporale **orario**, perciò costituito da 8760 record, corrispondenti esattamente al numero di ore in un anno; il secondo, più *fitto*, con passo temporale di un record ogni **quarto d'ora**, costituito da 35040 record (= 8760 x 4).

Per l'anno con passo di un quarto d'ora valgono ancora le formule viste sopra per il caso orario, con la sola differenza che ora il pedice  $h$  denota i quarti d'ora e varia nell'intervallo  $0 \div 95$  (96 sono infatti i quarti d'ora in un giorno).

Come si è accennato, la fonte delle stime della GHI è costituita dal database ENEA costruito a partire dalle immagini satellitari METEOSAT di copertura nuvolosa, ricevute ogni quarto d'ora a partire dal 2006. Le immagini hanno una risoluzione spaziale di  $(1,3 \times 1,3) \text{ km}^2$  circa, largamente sufficiente a caratterizzare il territorio italiano sotto il profilo radiativo. Al momento, sono disponibili e sono state elaborate le immagini di 12 anni, dal 2006 al 2017. Gli algoritmi messi a punto in ENEA, basati su appropriati modelli di comportamento dell'atmosfera, consentono di stimare il dato di radiazione a partire dal valore codificato della copertura nuvolosa. L'estrazione dei valori dalle mappe è possibile per qualunque sito geografico – e dunque per le undici località prescelte per questo lavoro – una volta note le sue coordinate geografiche e individuata la sua posizione all'interno della mappa.

Per quanto riguarda l'altra grandezza inserita nell'anno statistico, ossia la temperatura dell'aria, purtroppo il database ENEA non dispone di serie storiche di essa. Cionondimeno, è relativamente facile reperire tali dati in quanto misure e stime di temperature si producono da più lungo tempo (anche ultrasecolare) e per un gran numero di località in Italia e altrove. Per il nostro lavoro si è attinto al programma di simulazione Meteonorm, del quale l'ENEA possiede la licenza, che è in grado di produrre anni meteorologici tipici delle grandezze meteo-climatiche per qualunque sito della Terra (Meteonorm Software: <https://meteonorm.com/en/>).

Meteonorm attinge a un proprio vasto database di serie storiche di parametri meteo-climatici (temperatura, pressione, umidità, piovosità, vento ecc.) misurati in migliaia di stazioni sparse in tutto il mondo e, per posti non coincidenti con le stazioni di misura, produce i dati per interpolazione geografica a partire dalle stazioni spazialmente vicine. Il risultato è una serie annuale di dati meteo-climatici attinenti alla località scelta, con una granulosità temporale che arriva fino al minuto. Si tratta di dati *simulati*, dunque non di misure (oppure stime a partire da altre grandezze) ma la simulazione tiene conto delle caratteristiche medie (per il lungo termine) e di variabilità meteorologica (per il breve termine) riscontrabili nell'area geografica in cui si trova la località d'interesse.

A partire dai dati Meteonorm al minuto sono state costruite le serie annuali della temperatura dell'aria  $T$  delle 11 località, sia con passo temporale orario, sia con quello pari al quarto d'ora. Poiché la serie Meteonorm è nominalmente costituita con i dati di un solo anno, sebbene questi si ottengano comunque per sintesi da serie pluriennali, non è stato possibile esprimere il valor medio e lo scarto quadratico medio allo stesso modo di come si è fatto per la radiazione solare. Di conseguenza, la media e lo scarto sono stati calcolati in maniera differente, ossia: per ogni  $h$ -esima ora giornaliera ( $h = 0 \div 23$ ) di ciascun  $g$ -esimo giorno dell'anno ( $g = 1 \div 365$ ):

- la media di  $T$  è stata posta uguale alla media delle temperature delle ore  $h$ -esime dei 13 giorni costituenti l'intervallo di giorni centrato su  $g$ . In formula:

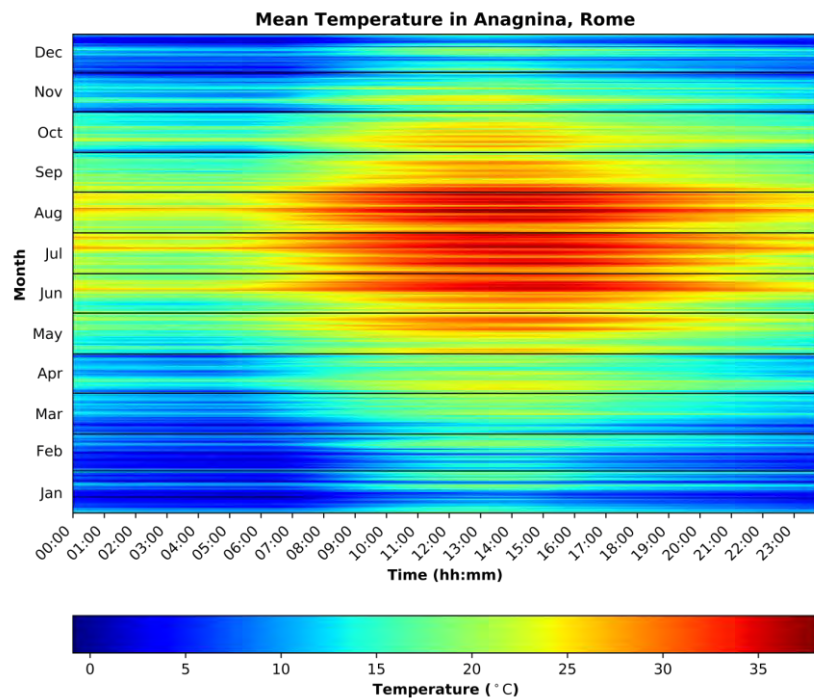
$$\bar{T}_{gh} = \frac{\sum_{j=g-6}^{g+6} T_{jh}}{13} \quad (4)$$

- la variabilità di  $T$  è stata invece determinata con scarto quadratico medio degli stessi dati:

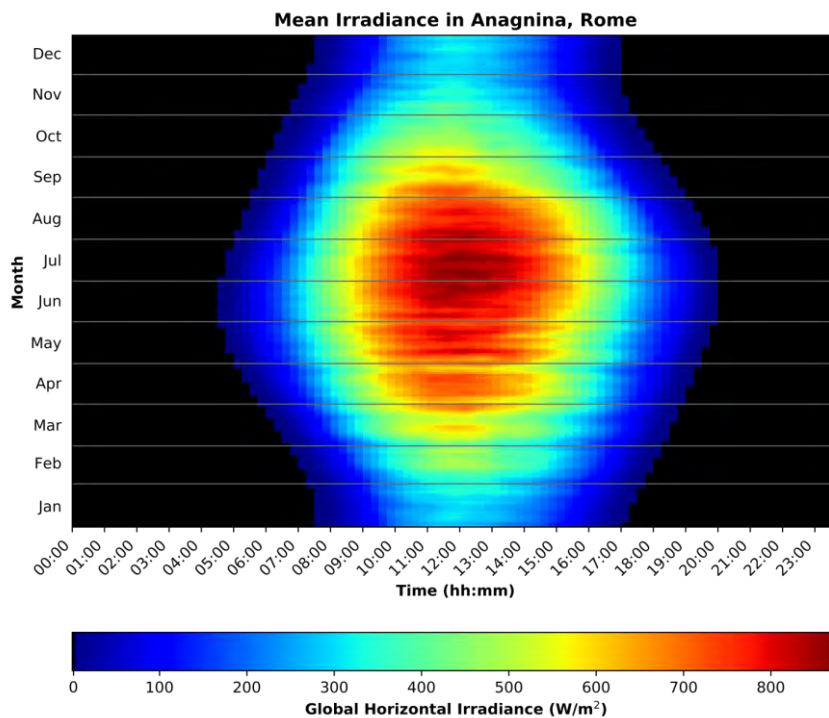
$$\text{scarto}(T_{gh}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=g-6}^{g+6} (T_{jh} - \bar{T}_{gh})^2}{13}} \quad (5)$$

Si noti che la media e lo scarto sono stati ricavati da una serie annuale unica (Meteonorm) ma, ciò nonostante, i valori che si ottengono sono rappresentativi del periodo di lungo termine, in quanto pluriennali sono le sequenze temporali utilizzate da Meteonorm per elaborare il proprio anno tipico. La dicitura  $\text{scarto}(T)$  in vece di  $\text{sqm}(T)$  rimarca il fatto che la procedura per esprimere la variabilità *attuale* della

temperatura è differente da quella utilizzata per l'irradianza solare. Il numero di giorni (13) è stato stabilito per renderlo comparabile con il numero di anni (12) usato per l'irradianza.



**Figura 16 - Variazione giornaliera dell'andamento annuo della temperatura media in diverse fasce orarie per la località "GRA – Anagnina"**



**Figura 17 - Variazione giornaliera dell'andamento annuo della irradianza globale orizzontale media in diverse fasce orarie per la località "GRA – Anagnina"**

Un esempio del risultato finale è mostrato in Figura 18. Si tratta dell'anno statistico con passo orario relativo alla località di Ardea. Ogni record (riga) è riferito a un'ora (8760 ore per un anno). Le prime colonne sono di anagrafe, in quanto contengono il codice della località (si confronti con la Tabella 3) e l'indicazione del giorno e dell'ora a cui il record è riferito (compreso il giorno giuliano). Una colonna esplicita il riferimento orario: CET sta per Central European Time, ovvero il fuso orario a cui appartiene l'Italia. Si tenga conto però che in estate l'Italia adotta l'ora legale, che posticipa di un'ora rispetto al CET (come esempio, le 15:27 dell'ora legale estiva corrispondono alle 14:27 CET). Comunque sia, per non ingenerare complicanze sotto l'aspetto formale e di calcolo, il riferimento adottato nell'anno statistico è sempre CET sia per i mesi invernali che per quelli estivi. Finalmente, le ultime quattro colonne riportano i valori veri e propri incluse nell'anno statistico, ovvero le quattro grandezze:

- 1) la media dell'irradianza solare globale orizzontale (GHI), espressa in  $Wm^{-2}$ ;
- 2) lo scarto quadratico medio (sqm) della GHI, anch'esso espresso in  $Wm^{-2}$ ;
- 3) la media della temperatura dell'aria (T), espressa in gradi centigradi ( $^{\circ}C$ );
- 4) lo scarto di T, anch'esso espresso in  $^{\circ}C$ .

Del perché si è chiamato scarto l'indice di variabilità della temperatura, rispetto allo scarto quadratico medio utilizzato per l'irradianza, si è già detto.

Figura 18 - Anno statistico con passo temporale orario (esempio)

Come si è detto, gli anni statistici prodotti sono due per località e differiscono per il passo temporale adottato. Per completezza, nella Figura 19 è mostrato un ultimo esempio, questa volta dell'anno statistico con passo temporale di un quarto relativo alla località di Testaccio (vedi Tabella 3).

Stazione elettrica	anno	mes	giorno	ora	min	sec	potenza (kW)	potenza (MW)	potenza (MW)	potenza (MW)	potenza (MW)
Testaccio	2010	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	1	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	1	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	1	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	2	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	2	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	2	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	3	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	3	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	3	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	4	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	4	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	4	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	5	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	5	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	5	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	6	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	6	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	6	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	6	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	7	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	7	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	7	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	8	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	8	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	8	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	9	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	9	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	9	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	10	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	10	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	10	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	11	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	11	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	11	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	12	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	12	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	12	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	1	12	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	1	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	1	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	1	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	2	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	2	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	2	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	3	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	3	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	3	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	4	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	4	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	4	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	5	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	5	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	5	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	6	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	6	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	6	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	6	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	7	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	7	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	7	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	8	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	8	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	8	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	8	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	9	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	9	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	9	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	9	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	10	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	10	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	10	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	10	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	11	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	11	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	11	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	11	45	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	12	0	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	12	15	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	12	30	0	0	0	0	0	0	0
Testaccio	2010	2	12	45	0	0	0	0	0	0	0

Figura 19 - Anno statistico con passo temporale pari a un quarto d'ora (esempio)

## 5 Esempio di applicazione del simulatore

In questa sezione sono riportati alcuni risultati restituiti dalla simulazione di un ipotetico scenario futuro di diffusione di flotte di auto elettriche nell'area metropolitana di Roma.

L'obiettivo è di mostrare gli ambiti e le capacità del simulatore come strumento di supporto sia all'analisi della variabilità spaziale e temporale del fabbisogno energetico delle auto elettriche, che alla progettazione degli interventi tecnologici e infrastrutturali più funzionali alle esigenze di mobilità e compatibilità con la rete elettrica.

I risultati qui elaborati hanno un valore esclusivamente dimostrativo frutto di una simulazione di un ipotetico scenario futuro caratterizzato da un'ampia diffusione di auto elettriche nel parco circolante relativo all'area di studio. Si tratta di uno scenario raggiungibile soltanto nel medio-lungo termine se si confermeranno gli attuali trend di crescita del mercato.

In particolare lo scenario è stato configurato ipotizzando un tasso di penetrazione del 30% di auto elettriche e una consistenza del parco auto circolante invariata rispetto a quella attuale. Per la rappresentazione del parco auto elettriche è stata presa in considerazione la più recente composizione auto (2018) per segmenti riportata in Figura 14.

Lo scenario simulato è stato inoltre configurato considerando le caratteristiche e le prestazioni delle auto elettriche presenti oggi sul mercato (Tabella 2) e gli attuali schemi di mobilità elaborati dal modello di generazione delle traiettorie a partire dai dati forniti dal campione di veicoli sonda.

Nel medio-lungo periodo queste due ultime ipotesi sono poco credibili. Con ogni probabilità gli attesi avanzamenti tecnologici nel settore delle batterie contribuiranno alla produzione di auto elettriche con maggiore autonomia e tempi di ricarica più brevi. Anche nel settore della mobilità urbana sono previste importanti innovazioni e trasformazioni che potranno favorire lo sviluppo di nuovi modelli di mobilità e di scelta modale alternativi all'auto privata, basti pensare ad esempio al previsto sviluppo dei servizi di mobilità condivisa e dei veicoli a guida autonoma.

Infine, nella modellazione delle scelte di ricarica sono state introdotte semplificazioni per poter ovviare alla mancanza di dati sperimentali sulle operazioni di ricarica, sull'applicazione di misure di smart-charging e sull'utilizzo delle batterie per l'accumulo diffuso e i servizi di rete (V2G).

È ovvio che, in futuro, la crescente disponibilità di dati e informazioni sull'interazione veicolo-rete e sulla mobilità degli individui contribuirà allo sviluppo di nuovi algoritmi di simulazione sempre più affidabili e di dettaglio anche in un'ottica di ottimizzazione in tempo reale delle risorse di rete.

Per questi motivi il simulatore è stato progettato con l'intento di garantire un'adeguata flessibilità grazie all'introduzione di tutti quei parametri di simulazione descritti in precedenza che possono essere utilizzati per riallineare il sistema a un particolare ambito di applicazione. Il simulatore può essere considerato come un "sistema aperto" che può essere aggiornato e integrato con nuove funzionalità per tenere conto delle future innovazioni che interesseranno la mobilità urbana e l'elettrificazione del trasporto.

La simulazione dello scenario proposto ha generato circa 3,5 spostamenti al giorno per veicolo ed una percorrenza media giornaliera per veicolo di poco superiore ai 30 km. Nelle figure 20 e 21 sono riportati a titolo di esempio alcuni risultati della simulazione aggregati per fascia oraria e per l'intera area di studio. Nei grafici l'asse delle ascisse rappresenta le ore del giorno secondo il sistema Greenwich Mean Time (GMT). Il corrispondente orario locale in Italia è pari a GMT +2 ora in quanto si è considerata nella simulazione l'ultima settimana del mese di Maggio.

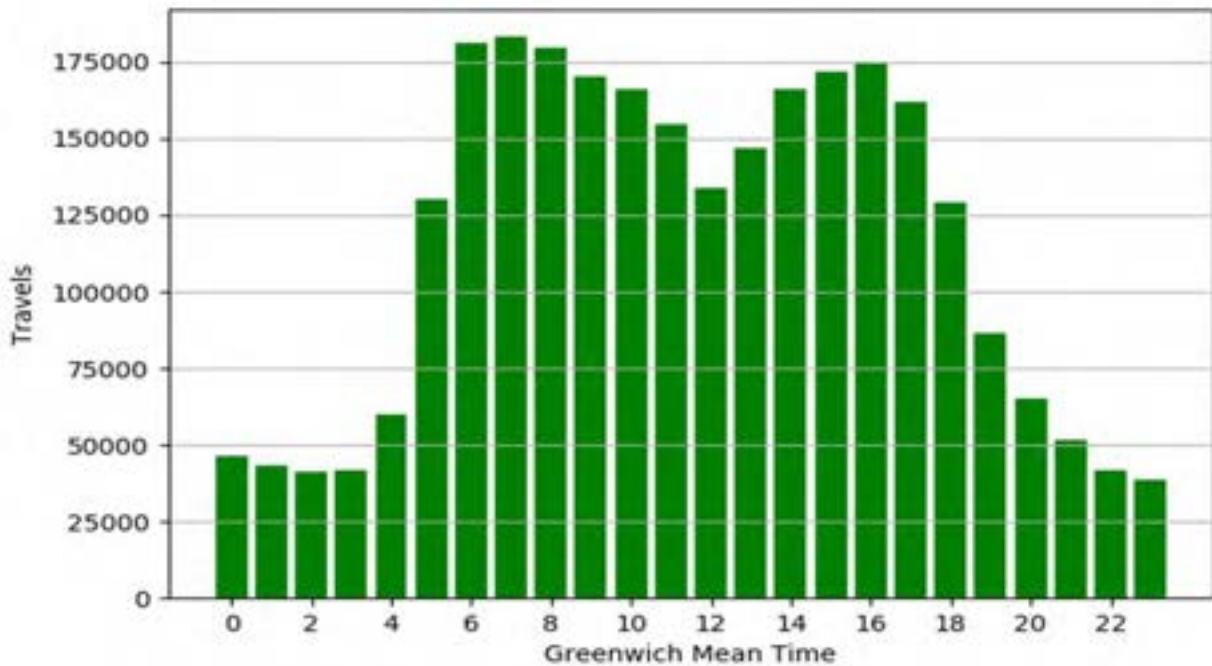


Figura 20 – Profilo orario dei viaggi simulati per l’intera area metropolitana di Roma

Nel diagramma a barre della figura 20 sono riportati il numero di spostamenti simulati giornalmente aggregati per fascia oraria. Il diagramma a barre presenta un classico andamento a doppia gobba con punte di traffico, in base all’ora locale, tra le ore 8 e le ore 9 e tra le ore 17 e le ore 18.

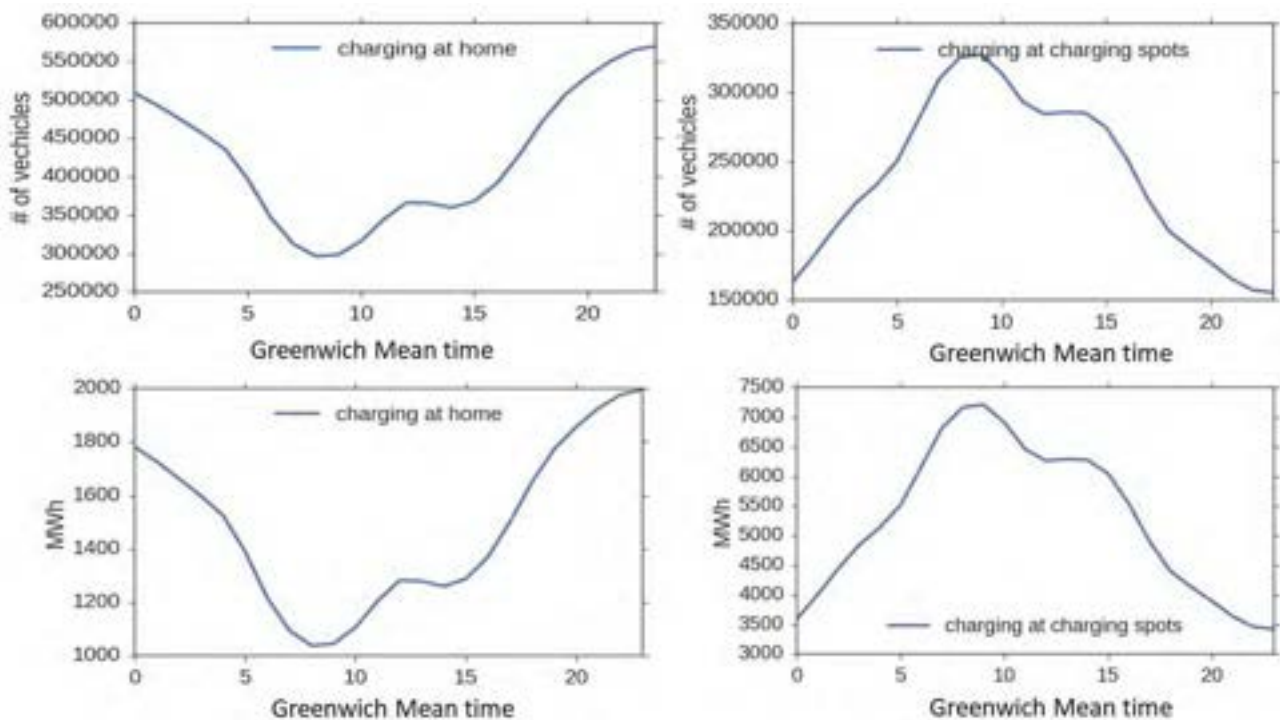


Figura 21 – Profili orari dei consumi totali riferiti alla ricarica domestica e pubblica

In figura 21 sono riportati i profili giornalieri del numero di veicoli in carica (in alto) e dei consumi elettrici (in basso) calcolati per i punti di ricarica domestici (al centro) e per le colonnine di ricarica pubblica (a sinistra).

Come prevedibile, i consumi per la ricarica domestica aumentano nelle ore serali di rientro a casa, per poi ridiscendere dalla mezzanotte fino alle prime ore del mattino. Per quanto riguarda invece le colonnine di ricarica pubblica, i consumi elettrici sono concentrati durante le ore diurne.

Gli andamenti orari dei consumi elettrici possono comunque differire in modo significativo da una zona all'altra della città.

Un'analisi più dettagliata dei risultati della simulazione è stata condotta su due specifiche zone della città (figura 22) molto diverse tra loro in termini di dimensioni e destinazione d'uso.

La prima zona (zona 1), situata all'interno del quartiere Tuscolano, è attraversata dalla via Tuscolana che rappresenta la spina dorsale del quartiere stesso. La zona 1, in cui risiedono più di poco più di 50.000 abitanti, è caratterizzata da un'alta densità abitativa (circa 10.000 abitanti/Km<sup>2</sup>) e dalla presenza di numerose attività commerciali e del settore terziario.

La seconda zona (zona 2), molto meno estesa e meno densamente abitata (circa 2800 abitanti/Km<sup>2</sup>) della zona 1, è situata nel quartiere Giuliano-Dalmata. La zona 2, non lontano dal quartiere EUR, gravita intorno alla stazione Laurentina, capolinea sud della linea B della metropolitana. In prossimità della stazione è presente un importante terminal bus e un parcheggio multipiano di scambio con circa 1250 posti auto, particolarmente utilizzato durante la giornata.



**Figura 22 – Zone di analisi dei risultati delle simulazioni**

La simulazione effettuata ha riprodotto in modo soddisfacente l'andamento tipico della mobilità veicolare generata ed attratta per le zone prese in esame. A titolo di esempio in figura 23 sono illustrati i due profili orari delle auto in sosta nelle due zone.

Come si può facilmente osservare nella zona 1 il numero di auto in sosta è più alto durante le ore notturne per via dell'elevatissima densità abitativa, mentre nella zona 2 il numero di auto in sosta risulta più alto nelle ore diurne per la presenza di un importante parcheggio di scambio. Questo risultato conferma la buona capacità del modello TGM di riprodurre adeguatamente i pattern di mobilità veicolare nelle diverse zone della città anche in relazione alla diversa vocazione generativa o attrattiva delle zone stesse nelle diverse ore della giornata.

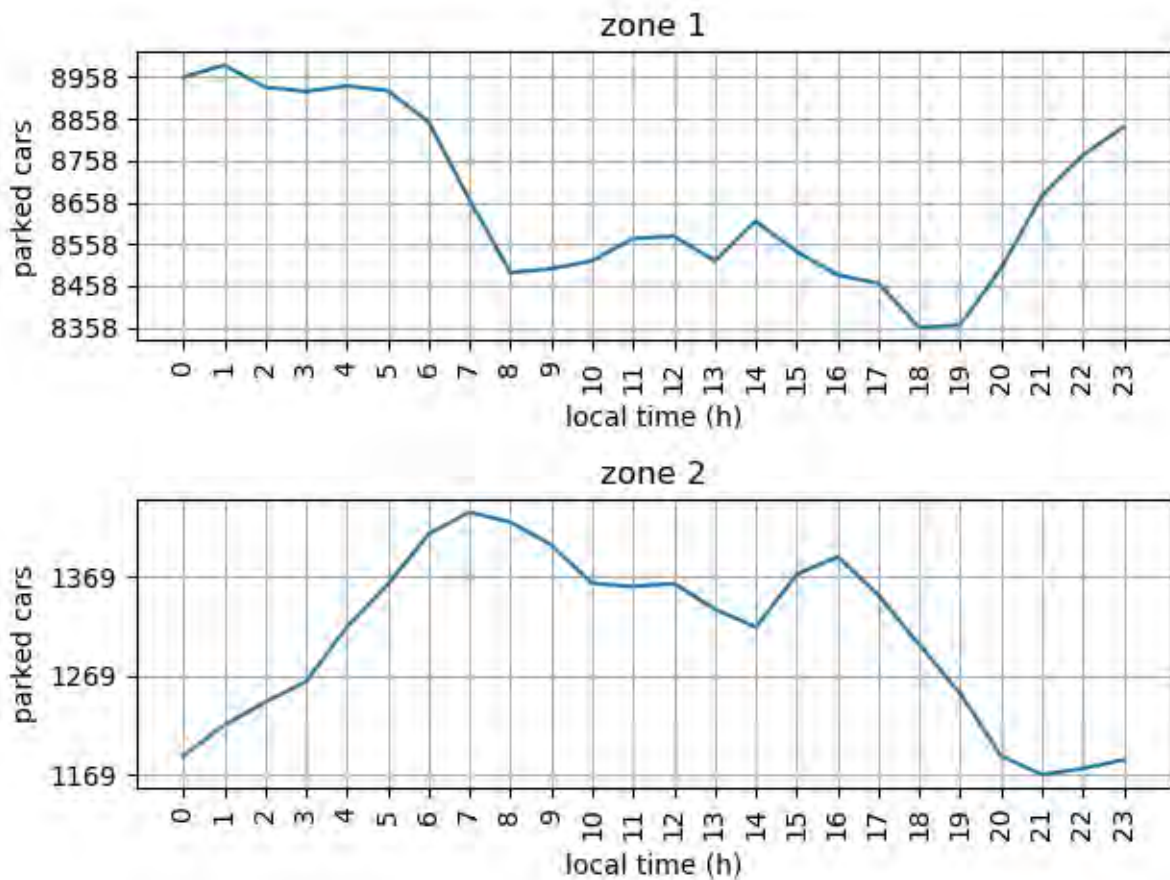


Figura 23 – Profilo orario delle auto in sosta

Nelle figure 24 e 25 sono riportati i profili orari relativi alle auto in fase di ricarica e ai relativi consumi elettrici per le due zone prese in esame. Per ciascuna zona sono riportati i due profili riferiti alla ricarica domestica e alla ricarica presso le colonnine pubbliche.

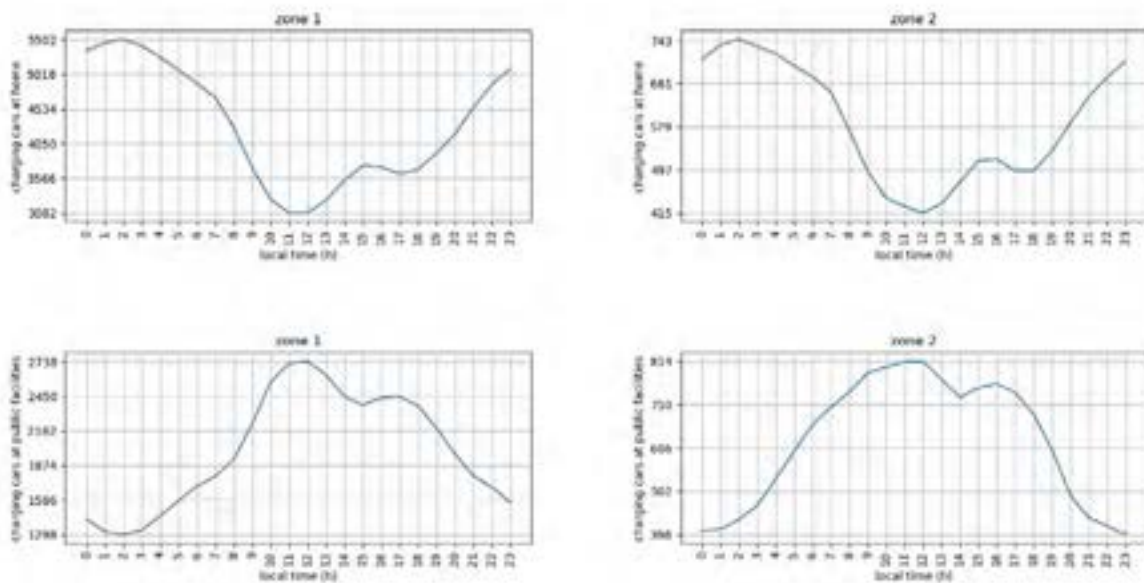


Figura 24 – Profilo orario delle auto in fase di carica per tipo di ricarica

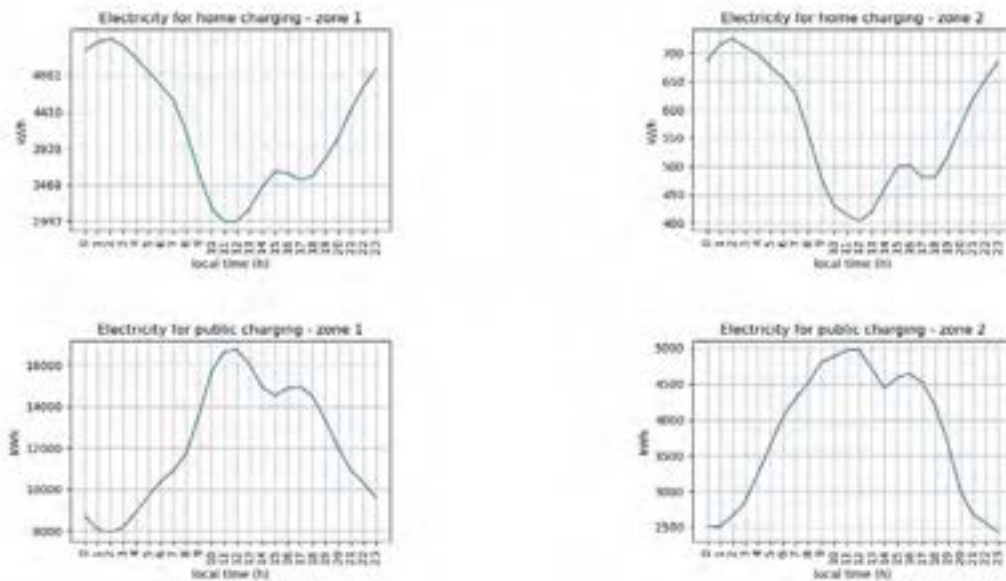


Figura 25 – Profilo orario del consumo elettrico per tipologia di ricarica

Infine in figura 26 sono riportati i profili orari di energia disponibile per l’accumulo o erogabile per i servizi di rete da parte dei veicoli elettrici in sosta nelle due zone. Si tratta di una stima teorica effettuata considerando tutti i veicoli elettrici in sosta collegati in modalità V2G.

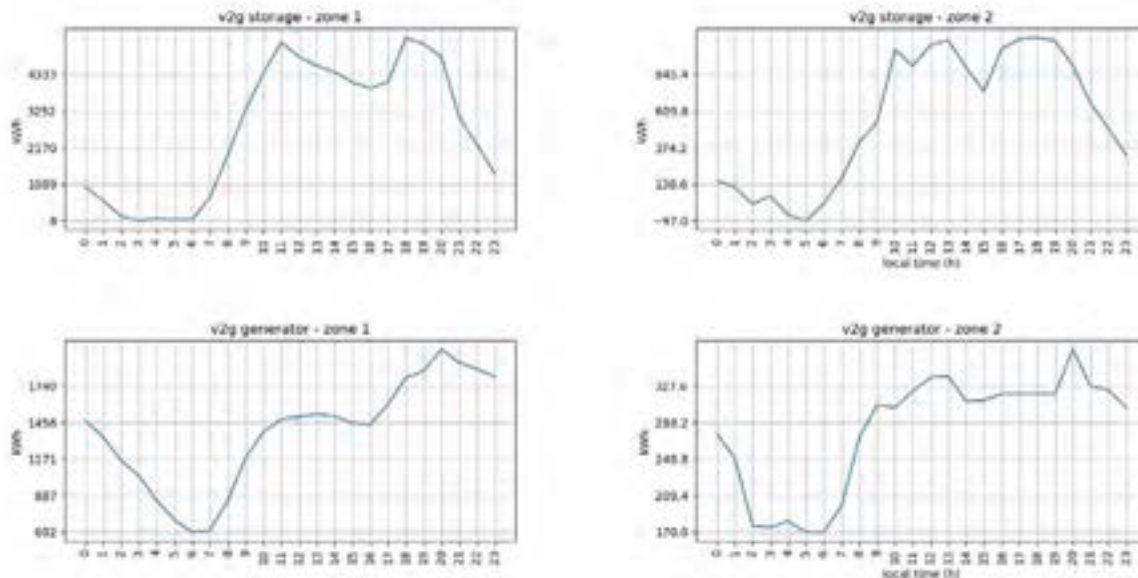


Figura 26 – Profilo orario di energia per l’accumulo e i servizi di rete in modalità V2G

## 6 Conclusioni

La transizione verso la mobilità elettrica è un percorso graduale caratterizzato da un contesto tecnologico in continua evoluzione e da un complesso processo decisionale che coinvolge molteplici soggetti della sfera pubblica e privata con obiettivi e interessi a volte contrastanti.

L'interesse della ricerca, in parte descritta in queste pagine, è nato proprio dall'esigenza di realizzare un valido strumento di supporto alla delicata fase di programmazione degli interventi tecnologici, infrastrutturali e gestionali più funzionali alle esigenze di mobilità veicolare e di compatibilità con la rete elettrica.

La ricerca, svolta congiuntamente con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "La Sapienza" e il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "RomaTRE", ha portato alla realizzazione di un prototipo software di simulazione capace di riprodurre e visualizzare su diverse scale spaziali e temporali le fluttuazioni della domanda di energia elettrica, corrispondenti a diverse ipotesi di diffusione dei veicoli elettrici, di configurazione dei punti di ricarica e di comportamento dei singoli individui nelle scelte di ricarica.

Lo strumento è oggi in grado di simulare scenari futuri di mobilità elettrica veicolare con un elevato livello di dettaglio coerente con le esigenze di studiare e valutare:

- misure di smart-charging per la gestione ottima dei carichi energetici;
- soluzioni impiantistiche per lo sfruttamento dell'energia prodotta da pannelli fotovoltaici;
- tecniche Vehicle-to-Grid per la piena integrazione energetica tra i veicoli elettrici e la rete elettrica.

Il simulatore è stato verificato e testato assumendo come caso di studio l'area metropolitana di Roma. Il sistema di modelli è stato costruito e calibrato utilizzando dati e informazioni sull'assetto insediativo e territoriale, sugli aspetti socio-economici, sulle condizioni climatiche e meteo, sugli spostamenti e sulle soste effettuate da un consistente campione di veicoli privati e dal programma di esercizio del parco autobus per il TPL.

L'attività di test ha riguardato inoltre sia il front end dell'ambiente software ossia la parte visibile all'utente e con cui egli può interagire (interfaccia utente), sia il back-end ovvero la parte che non è visibile, ma che esegue tutte le operazioni alla base del funzionamento del simulatore.

L'applicazione Front-end è stata configurata per permettere all'utente di eseguire le simulazioni, nonché di visualizzare dati fondamentali e risultati dei processi di simulazione, sia in forma disaggregata su mappa georeferenziata attraverso una struttura a celle esagonali, sia in modalità aggregata, per mezzo di grafici e tabelle riassuntive, per una più agevole comprensione delle simulazioni effettuate.

Sono stati inoltre studiati e valutati scenari futuri di penetrazione di flotte di veicoli elettrici, di configurazione della rete di colonnine di ricarica e di interazione dei veicoli con la rete di infrastrutture di ricarica per valutare e sperimentare le capacità e potenzialità del simulatore.

Il simulatore è attualmente accessibile via WEB (<http://whatif.cslparis.com/e-mobility/>) soltanto a scopo dimostrativo.

L'ambiente di simulazione realizzato con questo lavoro di ricerca può sicuramente essere considerato come base di partenza e punto di riferimento dal quale partire per successivi aggiornamenti e integrazioni per tener conto di esigenze specifiche di alcune applicazioni o di future innovazioni che interesseranno la mobilità urbana e l'elettrificazione del trasporto.

Di sicuro, in futuro, la crescente disponibilità di dati e informazioni sull'interazione veicolo-rete elettrica e sulla mobilità degli individui contribuirà sempre più al miglioramento e al potenziamento delle capacità simulate e operative dello strumento ad oggi realizzato, anche in un'ottica di ottimizzazione in tempo reale delle risorse di rete.