



Caratteristiche e funzionalità del simulatore di scenari urbani di mobilità elettrica

G. Valenti, C. Liberto, G. Messina, F. Spinelli

CARATTERISTICHE E FUNZIONALITÀ DEL SIMULATORE DI SCENARI URBANI DI MOBILITÀ ELETTRICA

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

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

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

Progetto: D.7 “Mobilità elettrica sostenibile”

Obiettivo: Scenari mobilità elettrica, sub-obiettivo a.3 Simulatore fabbisogno energetico mobilità urbana

Responsabile del Progetto: ing. Antonino Genovese, ENEA

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

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	6
2 OBIETTIVI E REQUISITI FUNZIONALI DEL SIMULATORE.....	10
2.1 CONTESTO OPERATIVO E TECNOLOGICO DI RIFERIMENTO	10
2.2 REQUISITI DEL SIMULATORE E ARTICOLAZIONE DELLE ATTIVITÀ	12
2.3 APPROCCIO E SCHEMA MODELLISTICO.....	15
3 ARCHITETTURA DELL'AMBIENTE DI SIMULAZIONE	20
3.1 BACKEND.....	20
3.1.1 <i>Dati</i>	20
3.1.2 <i>Funzioni Base del Backend</i>	21
3.1.3 <i>Funzioni Simulazione del Backend</i>	21
3.2 FRONTEND.....	21
4 LA POTENZIALITÀ DELL'USO DELL'ENERGIA SOLARE PER L'E-MOBILITY	24
4.1 LA STIMA DI DATI DI RADIAZIONE SOLARE.....	24
4.2 LE MAPPE ENEA DI RADIAZIONE SOLARE.....	25
4.3 UN ESEMPIO APPLICATIVO.....	29
5 MODELLAZIONE DEGLI SCENARI DI MOBILITÀ ELETTRICA.....	31
5.1 LUOGHI E COMPORTAMENTI PER LA RICARICA.....	31
5.2 CONFIGURAZIONE DELLA RETE DI INFRASTRUTTURE DI RICARICA	34
5.2.1 <i>Tipologie di dispositivi di ricarica conduttiva</i>	35
5.2.2 <i>La modellazione dell'offerta di ricarica</i>	37
5.3 MODELLAZIONE DELLA FLOTTA DI VEICOLI ELETTRICI	40
5.3.1 <i>Il mercato dei veicoli elettrici in Italia</i>	42
5.3.2 <i>Parametri e algoritmo di calcolo dei consumi delle auto elettriche</i>	45
5.3.3 <i>Parametri e algoritmo di calcolo dei consumi per gli autobus elettrici</i>	49
5.4 MODELLAZIONE DEI PROFILI DI CARICO DI UTILIZZAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA	51
5.5 CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI	54

Sommario

Di giorno in giorno si rafforza e si diffonde la convinzione secondo cui l'auto di domani sarà mossa dall'elettricità.

La rivoluzione elettrica segnerà il futuro del trasporto sulle quattro ruote e avrà un impatto sostanziale non solo sull'infrastruttura elettrica e sul modo di concepire la mobilità individuale, ma anche sull'architettura delle nostre città e delle nostre case.

Un cambiamento che sarà tanto più profondo quanto più l'energia utilizzata dalle vetture elettriche sarà generata da fonti rinnovabili e distribuita attraverso reti intelligenti.

La transizione verso la mobilità elettrica è comunque un percorso graduale condizionato 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.

In questo quadro è di cruciale importanza studiare e realizzare soluzioni efficienti per la diffusione di una rete di infrastrutture di ricarica capace di risolvere le criticità legate all'autonomia dei veicoli elettrici, di gestire i sovraccarichi della rete elettrica e di massimizzare la redditività del servizio.

Da qui nasce l'esigenza di poter disporre di metodi e strumenti quantitativi utilizzabili per la comprensione e la previsione del comportamento dei conducenti dei veicoli elettrici in relazione a possibili ipotesi di configurazione della rete di infrastrutture di ricarica e di interazione con il sistema elettrico in contesti urbani e metropolitani.

Il documento riporta i risultati ottenuti dal team ENEA nel corso del primo anno di ricerca finalizzata alla realizzazione di un ambiente di simulazione di scenari urbani di mobilità veicolare elettrica.

L'obiettivo finale della ricerca è, in particolare, la realizzazione e sperimentazione di uno strumento efficace di ausilio ai decisori pubblici e privati, per la valutazione degli impatti della mobilità sul sistema elettrico, alla progettazione delle reti di ricarica dei veicoli elettrici e alla gestione ottima dei flussi energetici (Smart Charging).

L'ambiente di simulazione incorpora inoltre funzionalità che consentono di definire e studiare scenari VehicleToGrid (V2G), di dimensionare le stazioni di ricarica nei parcheggi di interscambio e di verificare la fattibilità di stazioni di ricarica alimentate da pannelli fotovoltaici.

Il simulatore, accessibile via WEB da remoto, include una suite di modelli, appositamente sviluppati, in grado di quantificare e stimare il potenziale andamento dei consumi elettrici associati a scenari di mobilità elettrica urbana con una elevata granularità spaziale e temporale.

L'attività di ricerca prevede la partecipazione congiunta del laboratorio "DTE-PCU-STMA" dell'ENEA, del Dipartimento di Fisica (DF) dell'Università di Roma "La Sapienza" e del Dipartimento di Ingegneria (DI) dell'Università degli Studi "RomaTRE".

Il team ENEA, che coordina le attività di questa linea di ricerca, ha il compito di definire i requisiti funzionali dell'ambiente di simulazione, di individuare la soluzione implementativa migliore atta a garantire gli obiettivi funzionali attesi e le modalità ottimali di interazione con l'esterno.

Il team ENEA cura inoltre 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.

Le attività ENEA sono inoltre orientate a sviluppare specifici metodi e modelli per valutare le potenzialità della tecnologia V2G intesa anche come strumento per incrementare la generazione locale da fonti rinnovabili.

L'attività di ricerca del team del DF è diretta allo studio e definizione degli algoritmi per riprodurre la mobilità veicolare tra le diverse zone della città per fascia oraria e giorno tipo, rappresentare l'offerta del servizio di trasporto collettivo e simulare il comportamento dei conducenti in relazione a possibili configurazioni dell'infrastruttura per la ricarica. Il team del DF ha in carico nel corso del secondo anno l'attività di implementazione e ingegnerizzazione dell'ambiente di simulazione.

Infine il team del DI ha come obiettivo lo studio e implementazione di algoritmi per la caratterizzazione della domanda di sosta nelle stazioni di interscambio e l'analisi di politiche di incentivazione atte a favorire l'uso delle postazioni di ricarica situate presso le stazioni stesse.

1 Introduzione

La transizione verso la mobilità veicolare elettrica è già stata avviata in Europa e nel resto del pianeta sulla spinta di due pressanti motivazioni: la decarbonizzazione del trasporto stradale, ancora oggi quasi interamente dipendente dalle fonti di energia fossile non rinnovabile e la tutela della qualità dell'aria nei centri urbani dall'inquinamento atmosferico ed acustico di cui il traffico veicolare è il principale responsabile.

La corsa alla mobilità elettrica sta spingendo come non mai l'industria automobilistica a investire nella ricerca e produzione di nuovi modelli in grado di garantire autonomie sempre maggiori e prezzi di mercato più bassi. Lo spostamento dell'industria automobilistica globale verso le auto elettriche è stimolato soprattutto dalle sempre più stringenti normative sui limiti di emissione dei veicoli di nuova immatricolazione e, in alcuni casi, da misure governative che fissano per i costruttori stessi quote minime di produzione e vendita di veicoli a emissioni zero.

L'acquisto di un'auto elettrica è in questo momento non alla portata di tutti a causa del costo delle batterie che rappresenta circa metà del costo del veicolo stesso. Tuttavia l'auto elettrica presenta costi di manutenzione più bassi perché ha un motore molto più semplice e con meno componenti rispetto a quello a combustione interna.

Si prevede comunque che le auto elettriche nei prossimi anni diventeranno più economiche da acquistare rispetto a quelle convenzionali, offrendo così risparmi immediati ai conducenti; a ciò contribuirà il progressivo calo del costo delle batterie proprio grazie alle economie di scala e a miglioramenti nelle caratteristiche chimico-fisiche dei componenti delle batterie stesse e nei processi produttivi.

La discesa dei prezzi delle batterie, insieme a migliorie riguardo la diffusione dei punti di ricarica e i tempi di ricarica, potranno incrementare la fiducia da parte degli acquirenti che vedranno l'acquisto di un veicolo elettrico una possibilità allettante quanto i veicoli con motori a combustione interna.

Il mercato delle auto elettriche include sia auto completamente elettriche (BEV-Battery Electric Vehicle), alimentate esclusivamente da un motore elettrico a batteria, sia auto ibride Plug-In (PHEV-Plug in Hybrid Electric Vehicle) la cui batteria può essere ricaricata dalla rete elettrica, come i BEV, o da un motore a combustione interna presente a bordo che permette di aumentare sensibilmente l'autonomia dell'auto stessa. L'auto Ibrida Plug-In è perfetta per chi percorre spesso brevi distanze, ma che, non di rado, si sposta anche su distanze che eccedono l'autonomia di un'auto elettrica pura. A livello mondiale le vendite di auto ibride plug-in rappresentano attualmente circa il 38% del mercato delle auto elettriche. Anche se a medio termine è previsto un passaggio totale alla trazione elettrica, per alcuni anni le ibride plug-in saranno una buona soluzione ponte tra la trazione termica e quella puramente elettrica.

Nel panorama attuale delle auto completamente elettriche, un gran numero di modelli (dalla Nissan LEAF alla Renault ZOE, fino alla Volkswagen e-Golf) può fare affidamento su batterie agli ioni di litio la cui capacità non supera i 41 kWh, per un'autonomia variabile tra i 190 e i 380 km. Per quanto riguarda le auto PHEV, l'autonomia in funzionamento elettrico è invece solitamente inferiore ai 60 km potendo contare sul motore a combustione interna per distanze che eccedono l'autonomia in modalità elettrica.

Va comunque osservato che l'autonomia di un veicolo elettrico non dipende solo dalla capacità delle batterie ma può variare sensibilmente in base alle condizioni della batteria, allo stile di guida (ecologico, normale, sportivo), al tipo di strada (percorso urbano, extra-urbano, autostrada), alla tipologia di percorso (salita, discesa, pianura), alla temperatura esterna e all'uso del climatizzatore.

Lo mobilità elettrica nelle aree urbane e metropolitane non è confinata esclusivamente alle auto ma coinvolge anche altri tipi di veicoli: biciclette a pedalata assistita, scooter, moto, furgoni e mezzi del trasporto collettivo. In particolare il mercato degli autobus elettrici è previsto in crescita nei prossimi anni. I modelli di autobus più recenti sono alimentati da batterie al litio di nuova generazione capaci di garantire fino a 300 km con una sola ricarica. Nelle sperimentazioni condotte finora la ricarica completa delle batterie avviene in deposito, mentre ai capolinea durante la sosta, si utilizzano dei pantografi per le operazioni di ricarica rapida.

Da alcuni anni in diverse città all'estero e recentemente anche in Italia si moltiplicano i progetti per favorire la diffusione della mobilità elettrica anche attraverso il sostegno di variegati meccanismi di incentivazione e defiscalizzazione, come ad esempio gli incentivi diretti all'acquisto dei veicoli, le agevolazioni alla circolazione e alla sosta, la riduzione delle tariffe sui consumi elettrici, il cofinanziamento pubblico per lo

sviluppo della rete di infrastrutture di ricarica e le agevolazioni fiscali per i soggetti privati che si dotano di infrastrutture di ricarica.

La presenza capillare sul territorio di un'adeguata rete di infrastrutture di ricarica è senza dubbio un fattore chiave per la diffusione dei veicoli elettrici. E' necessario inoltre attrezzare le case in modo che sia possibile ricaricare l'auto nel proprio garage, gestire le modalità di fatturazione e gestire il processo di carica in maniera "intelligente".

Attualmente sono considerate tre possibili soluzioni di ricarica: la ricarica conduttiva attraverso cavo di alimentazione, la ricarica induttiva senza fili sia stazionaria che in movimento (allo studio), e infine la "battery swap" che contempla la sostituzione della batteria scarica con una carica.

Nell'ambito della ricarica conduttiva, si distinguono poi i sistemi lenti (monofase o trifase), accelerati (trifase) e veloci (in CA e in CC). Nei sistemi lenti la ricarica può essere effettuata con potenza compresa tra 3 kW (16 A a 220 V) con allacciamento monofase e 7 kW con allacciamento trifase. Per i sistemi di ricarica accelerata si utilizza una potenza superiore ai 7 kW e inferiore ai 22kW (32 A a 400 V). Infine nei sistemi di ricarica veloce le potenze disponibili variano tra i 43 kW (63 A trifase a 400 Vca) e i 50÷60 kW (120 A a 400 Vcc).

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, la modalità e il luogo della ricarica.

Non è ancora chiaro se la rete allo stato attuale potrà sopportare un alto livello di penetrazione di veicoli elettrici anche in considerazione del fatto che le ricariche verranno effettuate verosimilmente nelle ore in cui la domanda di energia per altri usi è elevata e in aggiunta concentrate in alcuni punti del territorio (es. stazioni di servizio)

Va comunque tenuto presente che il consumo annuo di energia di un veicolo elettrico, che percorre intorno ai 13.000 km/anno, è confrontabile con i consumi annuali di una famiglia media (circa 2.600 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. Il fabbisogno energetico aggiuntivo necessario a sostenere l'elettificazione del 50% dei circa 37 milioni di veicoli circolanti in Italia è stimato intorno al 12%.

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 non essere sostenute dalla rete di distribuzione 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 microgrid, vale a dire di reti elettriche di piccole dimensioni interconnesse con la rete di distribuzione elettrica. Una microgrid è costituita da più unità di produzione e consumo collegate non solo dal punto di vista elettrico, ma anche attraverso un sistema di comunicazione per lo scambio di informazioni tra le unità e il sistema di controllo centrale atto a supervisionare e regolare in tempo reale lo scambio bidirezionale dei flussi energetici all'interno della microgrid stessa.

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.

Come si può facilmente evincere dalle considerazioni fin qui esposte, la transizione verso la mobilità elettrica è un percorso graduale profondamente condizionato da un contesto tecnologico e organizzativo piuttosto articolato e in continua evoluzione.

Il successo della propulsione elettrica non dipende solo dallo sviluppo e produzione di veicoli più efficienti e a prezzi più competitivi da parte delle case automobilistiche. E' altresì cruciale realizzare una capillare rete di punti di ricarica dimensionata secondo modelli che rispondono alle reali esigenze di spostamento dei conducenti e dotata di avanzati servizi ICT per il monitoraggio e la gestione delle operazioni di prenotazione, ricarica e pagamento.

Anche lo sviluppo delle reti elettriche digitali e intelligenti da parte delle Utilities può direttamente influenzare la diffusione su larga scala della mobilità elettrica, abilitando una serie di servizi e funzionalità d'importanza strategica, come per esempio l'accumulo dell'energia prodotta da impianti rinnovabili nella batteria del veicolo. Proprio sul tema dell'accumulo di energia, l'auto elettrica si pone inoltre come un nuovo attore del sistema elettrico grazie proprio alla tecnologia V2G che abilita la possibilità di introdurre nuovi schemi di gestione delle fasi di ricarica in funzione dello stato della rete e dei servizi di bilanciamento dei flussi energetici in cambio di una remunerazione per il proprietario dell'auto.

La diffusione di massa delle auto elettriche nelle aree urbane e metropolitane presuppone una grandissima capacità di integrazione tecnologica ed organizzativa mirata allo sviluppo di una rete di ricarica, sia pubblica sia privata, coerente con le effettive esigenze di mobilità e con le prestazioni della rete elettrica. Appare inoltre di fondamentale importanza la corretta integrazione dell'infrastruttura di ricarica con la rete di distribuzione attraverso lo sviluppo di tecnologie smart per bilanciare meglio le fluttuazioni della domanda energetica ed estendere lo sfruttamento dell'energia prodotta da fonti rinnovabili.

In questo documento sono riportati i risultati del primo anno di ricerca finalizzata allo sviluppo di un ambiente di simulazione per l'analisi e la valutazione di scenari legati alla diffusione di flotte di veicoli elettrici in contesti urbani e metropolitani. La realizzazione dell'ambiente di simulazione interattivo permetterà di visualizzare lo status quo della mobilità e della domanda di energia elettrica richiesta alla rete dai diversi settori e di concepire nuovi scenari e valutare la loro efficacia e le criticità.

Il simulatore è inteso pertanto come un nuovo strumento di ausilio alla governance e gestione energetica di una città, in particolare alla progettazione (geolocalizzazione e dimensionamento) delle reti di colonnine e stazioni per la ricarica dei veicoli e allo studio di soluzioni tecnologiche e impiantistiche per la gestione dei picchi di consumo energetico e della variabilità intrinseca delle fonti rinnovabili.

Una funzionalità fondamentale del simulatore è quella di riprodurre la sequenza di spostamenti giornalieri e settimanali di flotte di veicoli e di stimare il fabbisogno di energia elettrica nelle diverse zone della città in base alla fascia oraria e alla giornata tipo (feriale, semifestivo e festivo). Caratteristica principale del simulatore è di utilizzare raccolte estese di dati geo-referenziati sugli spostamenti effettuati da un campione di veicoli sonda, nonché dati pubblicati in modalità "Open-Data" sul programma di esercizio e sulla struttura della rete di Trasporto Pubblico (TPL).

L'attività di ricerca prevede la partecipazione congiunta del laboratorio "DTE-PCU-STMA" dell'ENEA, del Dipartimento di Fisica (DF) dell'Università di Roma "La Sapienza" e del Dipartimento di Ingegneria (DI) dell'Università degli Studi "RomaTRE".

L'ENEA, oltre a gestire le attività delle Università, definirà i requisiti funzionali del simulatore ed individuerà la soluzione implementativa migliore atta a garantire gli obiettivi funzionali e le modalità di interazioni con l'esterno. Analizzerà le proprietà dei modelli più adeguati 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. Le attività del team ENEA sono inoltre orientate a sviluppare specifici metodi per la stima dei profili orari di radiazione solare e della corrispondente potenziale generazione di energia elettrica prodotta dai pannelli fotovoltaici. In questo ambito saranno studiate le procedure per valutare le potenzialità della tecnologia V2G finalizzata ad incrementare la generazione locale da fonti rinnovabili e a stabilizzare la rete di distribuzione.

Nel corso di questo primo anno l'attività del Dipartimento di Fisica di Sapienza Università di Roma è stata rivolta principalmente alla modellizzazione dei fenomeni collegati ai comportamenti sulle scelte di mobilità e delle interazioni con le infrastrutture di ricarica (vedi report). Lo schema teorico dei modelli proposti dal DF è basato su un approccio data-driven che ha consentito di estrarre i pattern statistici di mobilità sfruttando diverse fonti di dati.

L'attività del Dipartimento di Ingegneria dell'Università RomaTre è stata orientata, invece, alla formulazione di modelli per la caratterizzazione della domanda di sosta nelle stazioni di interscambio e (es. stazioni autobus, metro e ferrovie) per l'analisi di politiche di incentivazione atte a favorire l'uso delle postazioni di ricarica situate presso le stazioni stesse (vedi report).

Questo documento riporta i risultati delle attività portate avanti dal team ENEA nel corso del primo anno di lavoro. Il documento è articolato in 4 sezioni.

La prima sezione illustra il contesto operativo e tecnologico di riferimento, i requisiti funzionali del simulatore e lo schema modellistico definito per la simulazione della mobilità elettrica e dei conseguenti carichi energetici sulla rete.

La seconda sezione è dedicata alla descrizione dell'architettura dell'ambiente di simulazione che sarà realizzato in una versione prototipale con una interfaccia interattiva per permettere la creazione di scenari di test, la modifica di alcuni parametri di ingresso ai modelli e la verifica tramite visualizzazione su mappa dei risultati delle analisi prodotte.

La terza sezione è dedicata alla modellistica sviluppata per la caratterizzazione spazio-temporale della radiazione solare e della produzione di energia da fotovoltaico. L'approccio proposto consente di ricostruire mappe di radiazione solare nell'area di studio e di valutare soluzioni impiantistiche di ricarica dei veicoli elettrici con pannelli fotovoltaici.

La quarta e ultima sezione illustra gli elementi di base che caratterizzano la modellazione degli scenari di mobilità elettrica, in particolare: le proprietà e le caratteristiche funzionali dei sistemi di ricarica delle batterie, la composizione della flotta e le prestazioni dei veicoli ed infine alcune indicazioni di riferimento per la riproduzione delle scelte di mobilità e ricarica dei singoli utenti.

2 Obiettivi e requisiti funzionali del simulatore

2.1 Contesto operativo e tecnologico di riferimento

La mobilità veicolare elettrica sta muovendo i suoi primi passi in Europa e nel resto del pianeta sostenuta dalle pressanti necessità di limitare la dipendenza energetica dai combustibili fossili, di contrastare i cambiamenti climatici e di migliorare la qualità dell'aria e dell'ambiente in particolar modo nelle città.

La diffusione dei veicoli elettrici e delle infrastrutture di ricarica avanzerà con una sempre più stretta integrazione funzionale e tecnologica con il sistema elettrico anch'esso entrato in una fase di radicale trasformazione dal modello centralizzato ad un modello di generazione energetica distribuita basata principalmente su fonti rinnovabili.

Il nuovo modello elettrico si caratterizzerà per la presenza di dispositivi intelligenti per la misura e il monitoraggio dei consumi e delle richieste, nonché di sistemi di accumulo in grado di sfruttare pienamente l'energia prodotta da fonti rinnovabili per loro natura intermittenti e non programmabili.

Un parco veicolare in gran parte elettrico potrebbe essere concepito e organizzato come un enorme accumulo mobile (V2G) che interagisce in modo intelligente con la rete elettrica, consentendo tra l'altro il pieno utilizzo delle fonti rinnovabili, la gestione flessibile della domanda elettrica e il conseguimento di vantaggi economici per i proprietari delle autovetture. Le soluzioni V2G potranno, ad esempio, essere implementate in parcheggi strategici come quelli di interscambio (park and ride) con soluzioni incentivanti per l'utente finale.

ENEL ha iniziato ormai da un paio di anni l'installazione di colonnine per la ricarica V2G in diversi paesi europei (Danimarca, Regno Unito, Francia e Germania); lo scorso anno ha siglato un accordo¹ con Nissan e l'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) per la realizzazione di un progetto dimostrativo basato sul sistema V2G presso la sede di IIT di Genova.

I veicoli elettrici e le infrastrutture elettriche di ricarica rappresentano pertanto l'anello di congiunzione tra il sistema elettrico e il sistema della mobilità che consentirà, anche, di trasferire la produzione di energia da fonti rinnovabili verso il sistema della mobilità e viceversa, aumentando così la flessibilità del sistema elettrico e la sostenibilità economica, energetica ed ambientale del trasporto passeggeri e merci.

Anche se le proiezioni indicano che l'avanzamento tecnologico determinerà nel tempo una significativa riduzione del costo delle batterie e un miglioramento delle prestazioni in termini di autonomia e accorciamento dei tempi di ricarica, nella fase iniziale la diffusione dei veicoli elettrici può essere sostenuta attraverso l'introduzione di incentivi per l'acquisto e di agevolazioni fiscali come ad esempio sconti RCA, esenzione bollo e costi ridotti di ricarica.

Non meno importanti sono le misure incentivanti l'utilizzo dei veicoli elettrici nelle aree urbane come ad esempio la sosta gratuita o a tariffe agevolate nei parcheggi di scambio e sulle strisce blu, la libera circolazione durante i giorni di blocco e l'introduzione di restrizioni sempre più severe alla circolazione e alla sosta dei veicoli con motori a scoppio nelle aree più centrali e frequentate delle città.

La presenza capillare sul territorio di un'adeguata rete di infrastrutture di ricarica è un altro dei requisiti essenziali per concretizzare la transizione elettrica della mobilità. Questo obiettivo consente di risolvere il nodo della limitata autonomia delle auto elettriche attualmente presenti nel mercato.

Come è noto la preoccupazione persistente di non avere più carica sufficiente per terminare un viaggio, costituisce uno dei principali ostacoli alla diffusa adozione dei veicoli elettrici.

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 la batteria a eccessivi stress.

L'importanza della ricarica domestica è confermata dagli studi condotti finora sull'uso dei veicoli elettrici. In UK, ad esempio, risulta che (Overview of the Electric Vehicle market and the potential of charge points for demand response - ICF Consulting Services 2016) circa l'80% dell'energia utilizzata per la ricarica dei veicoli

¹ <https://corporate.enel.it/it/media/press/d/2017/05/enel-energia-nissan-italia-e-iit-insieme-per-lo-sviluppo-della-mobilit-elettrica>

è stata prelevata dalla rete domestica e che il 66% delle connessioni per la ricarica sono effettuate tra le ore 16 e le ore 22, in coincidenza del picco di domanda domestica.

Il secondo luogo di ricarica più conveniente per l'utente è sicuramente quello di lavoro dove il veicolo in genere staziona per lunghi periodi. La disponibilità di una stazione di ricarica sul posto di lavoro potrebbe fare la differenza tra acquistare o meno 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).

Per conseguire il funzionamento ottimale della mobilità elettrica occorrerà una completa interoperabilità tra veicoli elettrici e stazioni di ricarica standardizzate e un elevato grado di integrazione delle infrastrutture di ricarica nelle reti elettriche intelligenti dotate di sistemi ICT, di automazione e controllo, produzione diffusa da fonti rinnovabili e di accumulo efficiente.

L'integrazione dei sistemi di ricarica nelle reti intelligenti apre la possibilità concreta di sviluppare nuove funzioni, come ad esempio il monitoraggio dei carichi associati alle ricariche, il controllo delle ricariche sulla base della capacità produttiva del momento e l'accumulo di eventuale surplus di energia prodotta. In buona sostanza il nuovo modello energetico sarà strumentale all'adozione di politiche di gestione della domanda volte a stimolare comportamenti più consapevoli sui prelievi, incentivando ad esempio determinati consumi nelle fasce orarie in cui la domanda elettrica è minima (Smart Charging), grazie agli sconti sugli oneri di rete.

La propulsione elettrica offre indubbi vantaggi rispetto ai classici motori termici soprattutto nelle aree urbane dove la qualità dell'aria è fortemente compromessa dalle emissioni da traffico e la popolazione residente risulta spesso esposta a livelli di inquinamento superiori alle soglie massime ammissibili per la tutela della salute umana.

I veicoli elettrici attualmente in commercio 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 Car-Sharing, di distribuzione delle merci e di trasporto collettivo.

La transizione verso la mobilità elettrica nelle aree urbane è comunque una sfida impegnativa per le Amministrazioni Comunali che va affrontata attraverso la definizione di un programma coerente e integrato di misure volte a creare le condizioni più favorevoli all'uso dei veicoli elettrici e allo sviluppo di un'adeguata rete di infrastrutture di ricarica in grado di assicurare agli utenti l'accesso all'energia elettrica ovunque e in qualsiasi momento. Al riguardo un intervento significativo è stato fatto dalla città di Milano², che ha inserito uno specifico capitolo "mobilità elettrica" nel proprio PUMS - Piano Urbano della Mobilità Sostenibile, che va al di là della mera realizzazione della rete di ricarica.

La rivoluzione della mobilità elettrica sta portando le utilities elettriche e gli operatori di rete a investire in nuove infrastrutture di rete e di ricarica e a lanciare nuove soluzioni (Smart Charging, di accumulo, V2G e V2H) che promuovano una rete flessibile e resiliente. In Italia, Enel ha recentemente avviato un programma per una copertura capillare delle infrastrutture di ricarica in tutte le regioni italiane per contribuire alla crescita del numero dei veicoli elettrici e ibridi circolanti. Il piano prevede nei prossimi anni investimenti complessivi tra i 100 e i 300 milioni di Euro per lo sviluppo di una rete capillare di ricarica composta da colonnine Quick (22 kW) nelle aree urbane e Fast/Ultra Fast (50-150 kW) in quelle extraurbane.

Circa l'80% dei quattordici mila punti di ricarica verrà installato nelle zone cittadine, di cui il 21% nelle grandi aree metropolitane, il 57% nelle altre città, e il restante 20% circa a copertura nazionale, per garantire gli spostamenti di medio e lungo raggio nelle zone extraurbane e nelle autostrade.

² PUMS – Piano Urbano Mobilità Sostenibile – DOCUMENTO DI PIANO. 3/362. Comune di Milano

Nel piano ENEL è previsto uno sviluppo su due livelli, uno pubblico ed uno privato: da un lato la società collaborerà con i Comuni e le Regioni interessate, investendo direttamente nelle infrastrutture, dall'altro fornirà un contributo (fino al 65% dell'investimento) ai soggetti privati (Pmi, liberi professionisti e lavoratori autonomi, esercizi commerciali e Gdo) che vorranno partecipare al progetto.

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.

Oggigiorno, tuttavia, la conoscenza dei pattern (numero viaggi, distanze percorse, destinazioni) di uso dell'auto nelle aree urbane è spesso molto frammentata ed incompleta ai fini di una efficace programmazione degli interventi. Il grosso limite degli attuali metodi di rilevazione è determinato dall'alto costo e laboriosità delle indagini sulla domanda di mobilità in un'area urbana che ne rendono impraticabile la ripetitività e la continuità nel tempo.

Anche i sistemi di monitoraggio fissi (spire induttive, videocamere, ecc.) presenti in molte città per la rilevazione dei flussi veicolari e delle velocità e, in alcuni casi, per la stima dei tempi di percorrenza su predefiniti percorsi, sono inadatti alla ricostruzione dei pattern di uso dei veicoli.

Le ultime tendenze socio-economiche e le innovazioni tecnologiche che sempre più massicciamente spingono i cittadini a utilizzare la connessione alla rete mobile per interagire e scambiare informazioni, rendono, invece, possibile l'acquisizione, a basso costo e con maggiore efficienza, di una grande mole di dati particolarmente utili per lo studio dei comportamenti e delle abitudini dei viaggiatori nelle aree urbane e metropolitane.

Anche l'ampia diffusione di dispositivi mobili con localizzatore GPS, come smart-phone, tablet e terminali a bordo dei veicoli, potrà contribuire alla raccolta, capillare e a basso costo, di dati fondamentali per la ricostruzione degli effettivi profili di mobilità spazio-temporale di persone e veicoli all'interno delle città.

Una raccolta di dati così estesa in termini di volume e varietà fa assumere valore strategico alle metodologie di analisi e alle tecnologie di elaborazione dei dati a supporto delle decisioni delle imprese e delle città che mirano ad accelerare la diffusione dei veicoli elettrici.

La disponibilità di un'ampia base di dati sui pattern di mobilità individuale è inoltre di estrema utilità allo sviluppo e applicazione di avanzati strumenti modellistici per la simulazione di possibili scenari futuri e lo studio di interventi gestionali e infrastrutturali per poter soddisfare il fabbisogno energetico dei veicoli e aumentare la flessibilità del sistema elettrico.

2.2 *Requisiti del simulatore e articolazione delle attività*

Lo sviluppo di una rete di ricarica, sia pubblica che privata, coerente con le effettive esigenze di mobilità è il cardine attorno al quale ruota e ruoterà il successo dell'auto elettrica e attorno al quale cambieranno anche i volti delle città.

In questo scenario assume particolare rilievo lo sviluppo e l'applicazione di metodi e strumenti di supporto alla pianificazione delle infrastrutture di ricarica e alla gestione ottima dei carichi energetici sulla base delle contingenze della rete di distribuzione.

La presente ricerca si pone come obiettivo la realizzazione di un simulatore su scala urbana per l'analisi di scenari futuri di penetrazione di veicoli elettrici, nel parco auto circolante e nelle flotte di autobus utilizzate per il trasporto pubblico locale. La ricerca nasce dall'esigenza di fornire uno strumento attendibile per lo studio di soluzioni capaci di migliorare l'efficienza e l'affidabilità delle infrastrutture di ricarica, di bilanciare meglio le fluttuazioni dell'approvvigionamento e della domanda energetica ed, infine, di estendere l'utilizzo dell'energia prodotta da fonti rinnovabili.

Il simulatore, accessibile via WEB, è 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 stazioni per la 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 meno intense.

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 saranno 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 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 pertanto inteso come un nuovo strumento di ausilio a:

- Studio di scenari urbani di diffusione di veicoli elettrici nel parco auto circolante e nelle flotte di autobus del TPL;
- Stima del potenziale andamento spaziale e temporale dei consumi elettrici associati a scenari di mobilità elettrica urbana;
- Progettazione (geo-localizzazione e dimensionamento) di reti di stazioni per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica;
- Definizione di misure di smart-charging per la gestione ottima dei carichi energetici sulla base delle contingenze della rete di distribuzione;
- Valutazione di scenari Vehicle-to-Grid che permetteranno la piena integrazione energetica tra i veicoli elettrici e la rete elettrica;
- Studio 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;

- Analisi della fattibilità tecnica ed economica di soluzioni impiantistiche per estendere lo sfruttamento dell'energia prodotta da pannelli fotovoltaici.

Nel corso del primo anno sono state portate avanti le attività per la definizione degli obiettivi e dei requisiti funzionali del simulatore, la specificazione della struttura dei dati, del sistema di modelli e degli algoritmi, la progettazione dell'architettura software e lo sviluppo in forma prototipale di alcune parti del simulatore allo scopo di valutarne determinate caratteristiche.

Come ambito di riferimento per lo studio e definizione del sistema di modelli per la simulazione è stata scelta l'area metropolitana di Roma che costituisce un caso di studio di estremo interesse per l'analisi di scenari di mobilità elettrica e la stima dei potenziali impatti sul sistema elettrico. Il suo territorio, che corrisponde a quello della provincia di Roma, conta circa 4,35 milioni di abitanti e poco meno di 1,99 milioni di famiglie. 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. L'area metropolitana di Roma presenta inoltre un elevato tasso di motorizzazione, circa 69 auto ogni 100 residenti, 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 è piuttosto limitata se posta a confronto con le maggiori città europee, mentre 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 più di 3500 km di linee e circa 2300 autobus.

L'attività di ricerca prevede la partecipazione congiunta dell'ENEA, del Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "La Sapienza" e del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "RomaTRE".

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 i tracciati GPS di un campione di veicoli sonda, la struttura e il programma di esercizio del TPL, grandezze socio-economiche per zona censuaria e piani di realizzazione di infrastrutture di ricarica pubbliche. Nella modellizzazione ad agenti 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, la distanza totale e ricorrente percorsa giornalmente, le zone di destinazione e gli orari di partenza. La modellizzazione ad agenti include inoltre gli algoritmi e le variabili esplicative 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.

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.

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. Il simulatore sarà 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. L'ambiente software sarà strutturato in due parti: il front-end ed il back-end. Il front-end sarà la parte visibile dagli utenti con la quale essi interagiranno per predisporre gli scenari, eseguire le simulazioni e visualizzare dati e risultati su mappa. Il back-end sarà invece la parte software che permetterà l'effettivo funzionamento del simulatore. La parte di back-end, accessibile indirettamente dall'utente esclusivamente attraverso l'applicazione front-end, sarà costituita da tutti gli algoritmi necessari per le simulazioni degli scenari richiesti dall'utente ed, inoltre, ospiterà i sistemi sui quali risiedono le banche dati.

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 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 mappatura su base oraria della radiazione solare nell'area studio al fine 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.

2.3 *Approccio e schema modellistico*

Come già sottolineato in precedenza, il fine ultimo della ricerca è lo sviluppo di 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.

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.

L'idea centrale della ricerca è di sviluppare un framework di simulazione, basato sul paradigma della modellazione ad agenti, che consenta di riprodurre il funzionamento del sistema della mobilità veicolare di un'area urbana a livello microscopico, prendendo in considerazione il singolo conducente/veicolo e i suoi spostamenti.

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 possibile rappresentare più tipologie 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 il numero di spostamenti da effettuare durante la giornata, le zone di destinazione e i rispettivi orari di partenza

Per consentire la modellizzazione dei pattern di viaggio effettuati dai singoli individui è particolarmente utile discretizzare il territorio suddividendo l'area di applicazione secondo una griglia di esagoni regolari attraverso i quali è possibile descrivere, quantificare e distribuire spazialmente gli spostamenti.

A ciascun esagono sono 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 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, basato su agenti, 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.

La scelta di un approccio basato sul paradigma ad agenti è stata dettata dall'esigenza di avere un ambiente di simulazione capace di tener conto di proprietà legate ai 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 un modulo (Trajectory Generation Module-TGM) 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, se addestrato con ampie serie storiche, 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.

Il TGM interagisce con il Park & Ride Module (PRM) atto a 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 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 TGM riproduce anche le sequenze di viaggi effettuati dai singoli autobus per il servizio TPL. 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.

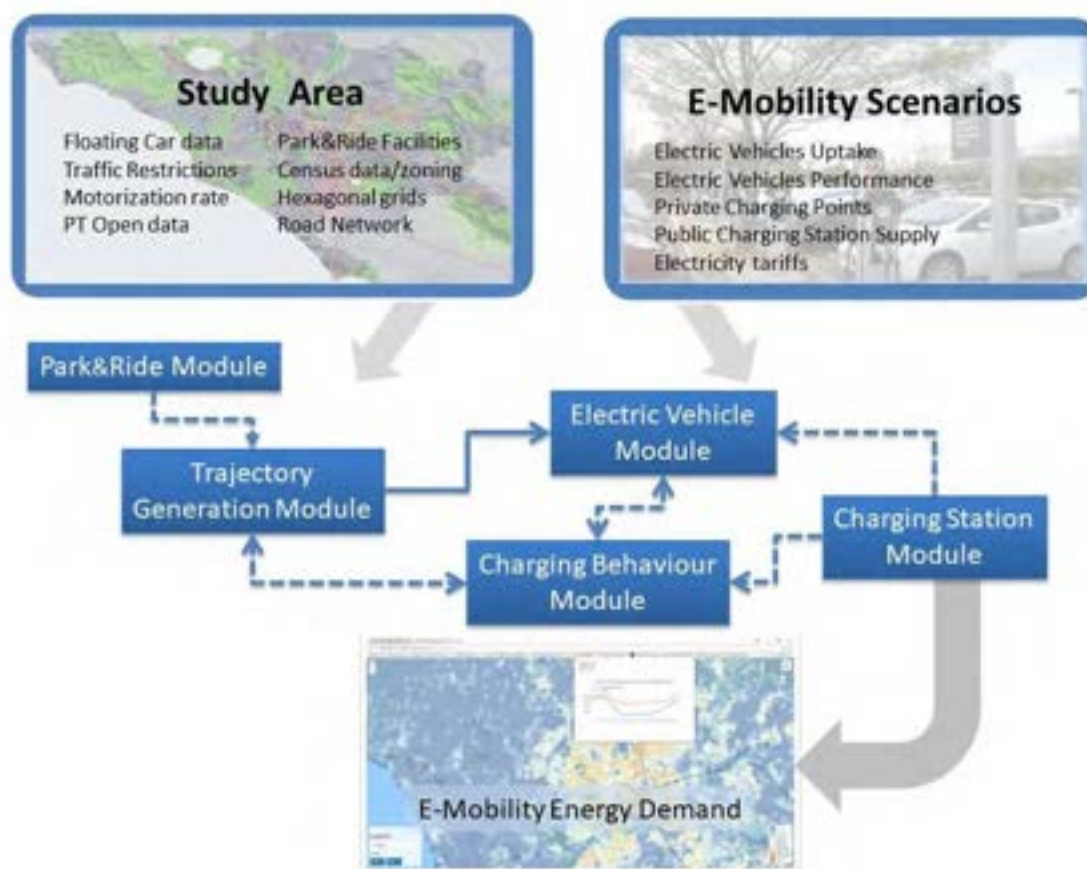


Figura 1: Schema di calcolo della domanda di energia per la ricarica dei veicoli elettrici

Nel simulatore sono previste inoltre le procedure (Domestic&Tertiar Energy Module-DEM) per generare gli andamenti temporali della richiesta di energia del settore residenziale e terziario 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 residenziale/terziario 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, le abitazioni e i servizi, organizzati per singola cella della griglia, l'approccio utilizza come dati di input le tipiche curve di carico giornaliero associate alle diverse categorie di utenza, includendo utenze residenziali e del settore terziario (istruzione, distribuzione, sanità, uffici, ecc.). Come è noto la curva di carico è un grafico che mostra l'ammontare di energia elettrica che l'utenza utilizza nell'arco delle 24 ore.

L'individuazione di tali curve non è comunque agevole; ogni tipologia di utenza ha una propria curva di carico specifica: si pensi per esempio alla curva di carico di un edificio ad uso residenziale o a quella di un edificio interamente destinato ad uffici. Inoltre il comportamento di ciascuna tipologia di utenza è influenzato da diversi fattori, come ad esempio la localizzazione geografica, la stagione dell'anno e il giorno della settimana. Per valutare l'incidenza del carico sulla rete elettrica occorre raggruppare le utenze in gruppi omogenei, individuare le curve di carico tipiche di ciascun gruppo e come esse contribuiscono a formare la curva di carico complessiva del sistema elettrico.

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 è completato da un modulo di post-processing e reporting dei risultati dei moduli precedentemente descritti. Il modulo mette in relazione i risultati delle simulazioni (mobilità, residenziale/terziario e solare) e produce informazioni sulla distribuzione spaziale, tramite mappatura su griglia, dei carichi energetici extra per effetto della sovrapposizione della domanda stimata per il settore civile/terziario e della mobilità elettrica.

Il modulo di post-processing integra 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.

Il modulo di post-processing elabora 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.

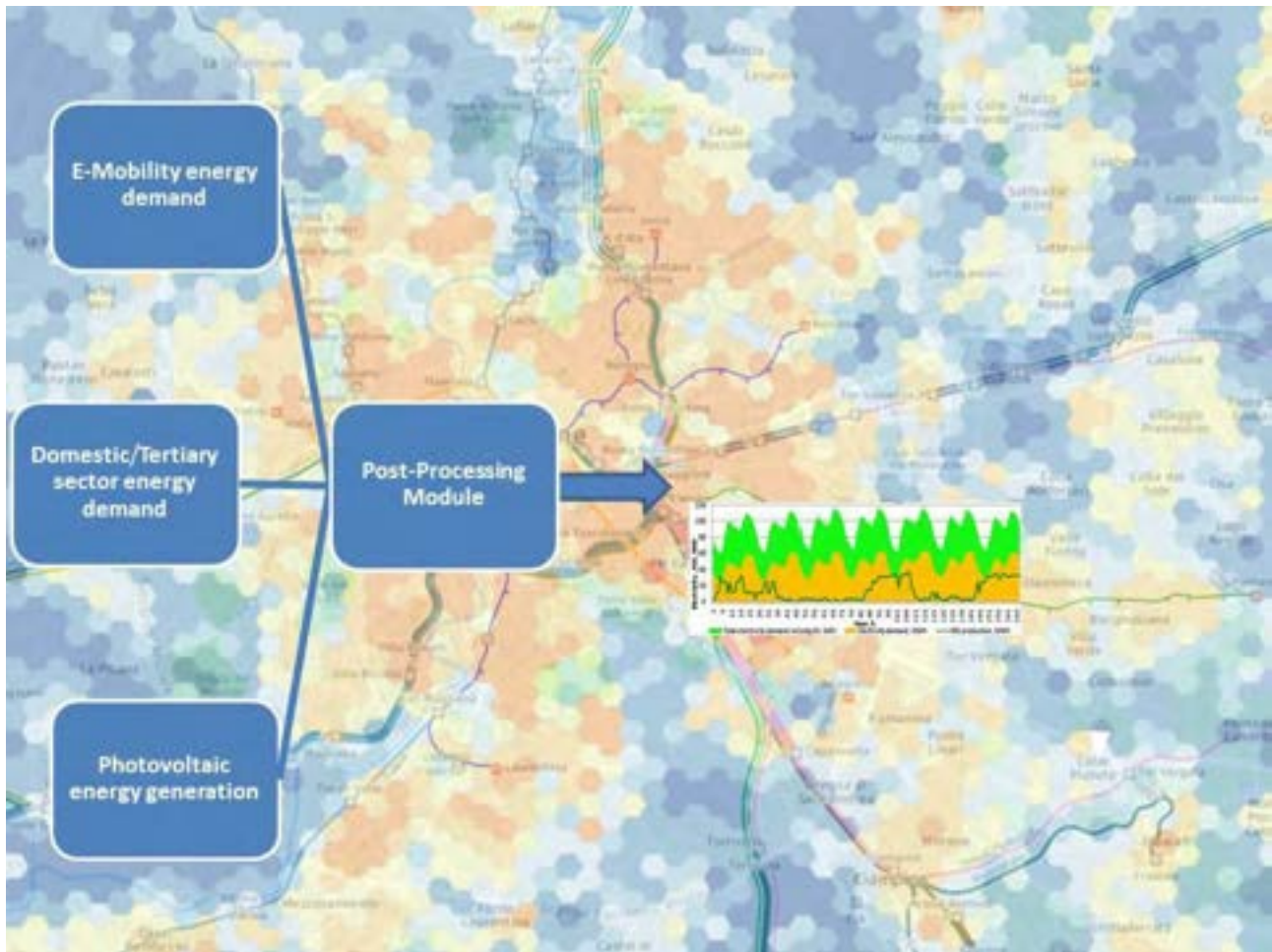


Figura 2: Schema modellistico ed esempio di output grafico del simulatore

3 Architettura dell'ambiente di simulazione

Come più volte evidenziato l'oggetto della presente ricerca è la realizzazione di un ambiente software di simulazione inteso come nuovo e utile strumento di ausilio allo studio di scenari di mobilità veicolare elettrica nelle aree urbane e metropolitane.

L'ambiente software sarà verificato e testato assumendo come caso di studio l'area metropolitana di Roma e permetterà 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.

Gli scenari di e-mobility potranno 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 viene discretizzata l'area di studio su intervalli temporali di 15 minuti.

L'ambiente di simulazione sarà realizzato in una versione dimostrativa con una interfaccia interattiva per permettere la creazione di scenari di test, la modifica di alcuni parametri di ingresso ai modelli e la visualizzazione su mappa dei risultati delle analisi prodotte.

Il simulatore è ideato come strumento utile, sia ai decisori pubblici e privati (Amministratori Locali, distributori e gestori dell'energia elettrica, gestori dei servizi di ricarica, ecc.), per prendere decisioni riguardo sia a politiche di sostegno alla diffusione della mobilità veicolare con propulsione elettrica, che a progetti volti alla realizzazione di infrastrutture di ricarica e al potenziamento della rete di distribuzione elettrica.

Il simulatore sarà 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. L'ambiente software sarà strutturato in due parti: il front-end ed il back-end.

Il front-end sarà la parte visibile dagli utenti con la quale essi interagiranno per predisporre gli scenari, eseguire le simulazioni e visualizzare dati e risultati su mappa. Il back-end sarà invece la parte software che permetterà l'effettivo funzionamento del simulatore.

La parte di back-end, accessibile indirettamente dall'utente esclusivamente attraverso l'applicazione front-end, sarà costituita da tutti gli algoritmi necessari per le simulazioni degli scenari richiesti dall'utente ed, inoltre, ospiterà i sistemi sui quali risiedono le banche dati.

Grazie alla sua semplicità di utilizzo e attraverso mappe semplici ed interattive questo strumento può essere facilmente adoperato anche da un'audience vasta e differenziata ed essere utilizzato come strumento di dissemination e awareness su temi legati alla mobilità elettrica e alla sostenibilità del trasporto urbano.

Il simulatore si baserà principalmente su librerie javascript per la componente frontend, nodejs, python e julia per il backend.

L'applicazione sarà compatibile con i più diffusi browser internet attualmente disponibili, sarà open-source e sarà rilasciata su piattaforme di sharing code con github.

3.1 Backend

Il backend sarà principalmente composto da un database NoSQL, una backend server basato su nodejs. Alcune funzioni di simulazione saranno scritte in python o julia.

3.1.1 Dati

I dati utilizzati dal simulatore saranno salvati in un database NoSQL come mongoDB che permetterà una efficiente gestione di grandi quantità di dati eterogenei e senza schemi.

MongoDB è un database orientato ai documenti, ognuno dei quali è memorizzato nel formato JSON. Il documento è fondamentalmente un albero che può contenere molti dati, anche annidati. I documenti sono raggruppati in collezioni che possono essere anche eterogenee.

Il backend dovrà interfacciarsi con il database per raccogliere molte informazioni e dati, da inviare poi al frontend, come:

- Dati sugli esagoni, come popolazione residente, macchine parcheggiate ecc...
- Dati sulle traiettorie dei veicoli generate dal modello in base al set dei parametri scelti.

- Dati sulle traiettorie dei veicoli modificate in seguito all'aggiunta al modello di base di comportamenti di ricarica.
- Dati relativi agli impianti di ricarica (es. dislocazione, tipologia di stazione, numero punti di ricarica).
- Dati aggregati relativi ai mezzi pubblici (es. tipologia di veicolo, linee e programma di esercizio).
- Dati salvati dei vari scenari precalcolati o provati dall'utente.

3.1.2 Funzioni Base del Backend

Le funzioni di base del backend saranno principalmente legate all'aggregazione della grande mole di dati presenti sul database attraverso query specifiche da effettuare al database.

In particolare le query di aggregazione saranno utilizzate per l'ottenimento delle seguenti analisi:

- Aggregazioni sui dati delle traiettorie, aggregazione oraria numero di veicoli in un esagono, numero di veicoli in carica, stato di carica medio dei veicoli;
- Query sui dati energetici: richiesta oraria di chilowattora per esagono e per tipologia di utenza;
- Altre grandezze utili al fine di una corretta simulazione di scenari futuri da decidere in fase di sviluppo.

3.1.3 Funzioni Simulazione del Backend

Uno degli obiettivi principali del simulatore è permettere di visualizzare possibili scenari di ricarica e di comportamento degli utenti per verificare l'impatto e la sostenibilità delle soluzioni proposte. Quindi sarà possibile modificare diversi parametri di input della simulazione così in relazione a diverse strategie per soddisfare la domanda di ricarica.

I diversi parametri modificabili così come i diversi modelli da utilizzare saranno decisi in maniera puntuale in fase di sviluppo in base ai test di fattibilità computazionale effettuati.

In particolare il simulatore permetterà:

- di utilizzare diverse classi di traiettorie in base alla variazione di alcuni dei parametri che influenzano il modello di generazione e distribuzione dei viaggi.
- Simulare diversi comportamenti di ricarica.
- Modificare l'offerta e la disposizione delle colonnine di ricarica.

I diversi scenari prodotti saranno poi salvati in una specifica collection all'interno del database.

3.2 Frontend

Il frontend avrà due compiti principali:

1. Visualizzazione dei dati fondamentali su mappa georeferenziata e in maniera aggregata delle principali quantità utili a comprendere e visualizzare lo scenario di mobilità elettrica selezionato.
2. Modifica dei vari parametri del modello e dello scenario di mobilità elettrica per crearne uno nuovo attraverso un editing grafico semplice ed intuitivo.

Il front end e la suddivisione ad esagoni dell'area di studio permette di avere in un singolo framework una visione di insieme, attraverso l'uso dei colori e la sovrapposizione di diversi layer informativi. Un esempio sul numero delle auto in ricarica è mostrato nella Figura 3.

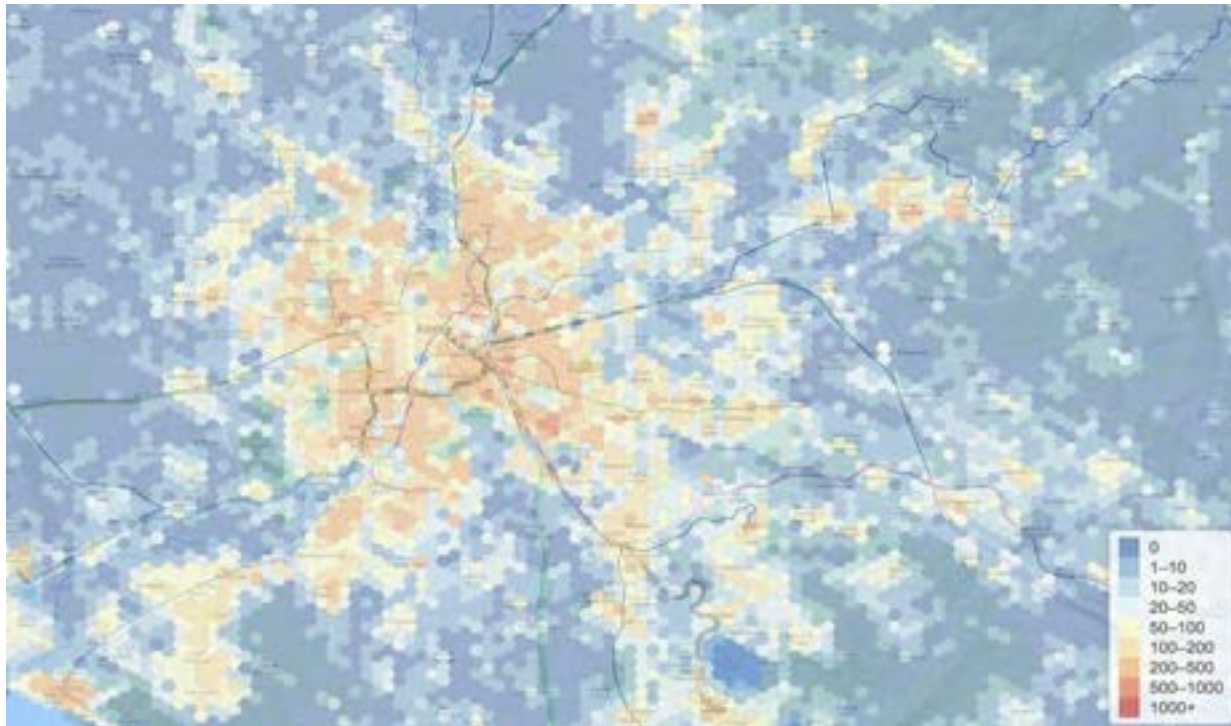


Figura 3: Mappatura con il numero di auto in fase di ricarica

Inoltre è possibile avere informazioni puntuali e di dettaglio sui singoli esagoni ed approfondire e scendere al livello locale attraverso il click sull'esagono, come mostrato nella Figura 4.

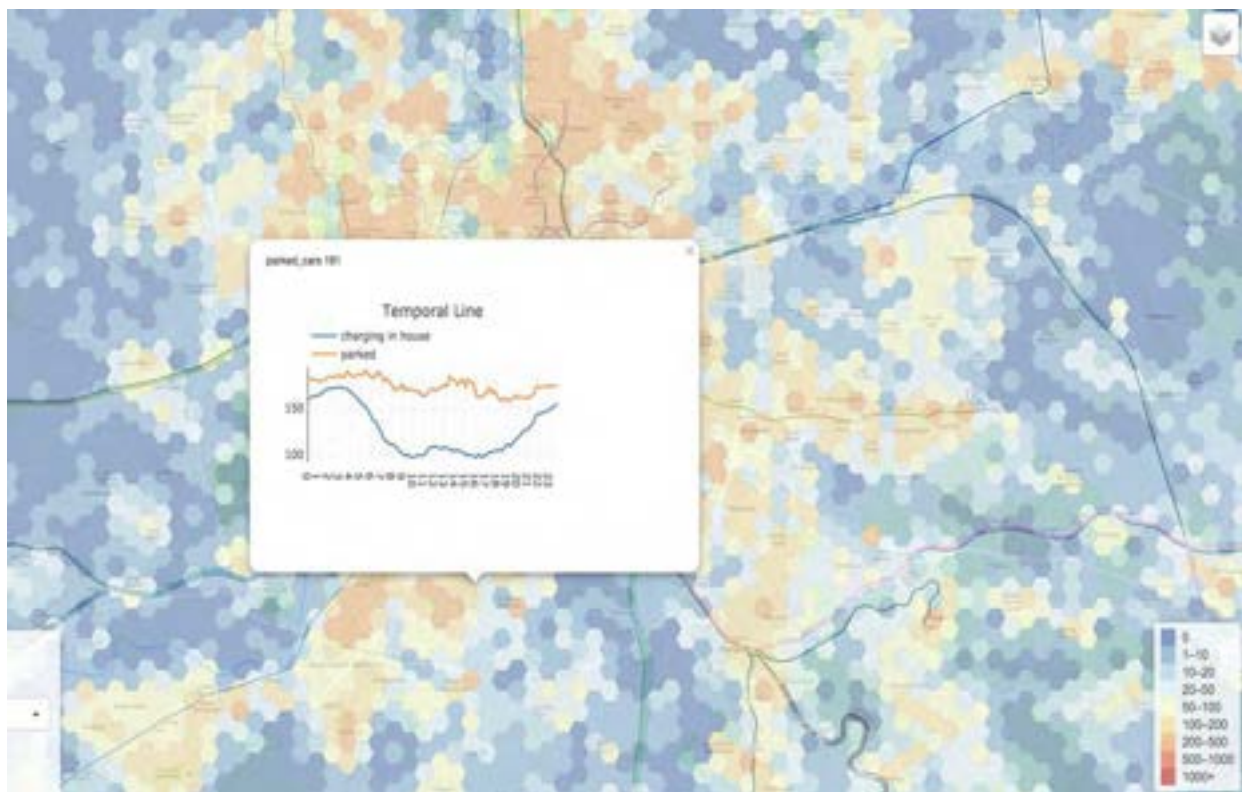


Figura 4: Esempio di dettaglio con profili orari

Attraverso barre laterali si potranno selezionare e sovrapporre differenti layer informativi che descrivono e mostrano i dati dello scenario selezionato.

Il simulatore avrà un'altra funzionalità grafica di interfaccia per permettere la modifica dei parametri dei modelli da sottoporre al server per la simulazione del nuovo scenario di traiettorie degli spostamenti urbani e dislocazione delle colonnine di ricarica.

Una prima versione interattiva di base del frontend può essere consultata al seguente link <http://project.citychrone.org/electric-car-rome/> in cui è implementata l'esplorazione di alcuni risultati ottenuti dal Dipartimento di Fisica dell'Università "La Sapienza" nella parte di sviluppo teorico dei modelli di simulazione. In particolare è possibile visualizzare il dato "statico" della densità di popolazione residente nell'Area Metropolitana di Roma, e dati "dinamici" ottenuti dalle simulazioni quali il numero di auto elettriche parcheggiate in una certa zona in ogni ora di una giornata e il numero di auto elettriche in carica (domestica) in quella stessa zona.

4 La potenzialità dell'uso dell'energia solare per l'E-Mobility

Una delle questioni più delicate e dibattute in ambito di elettrificazione della mobilità riguarda il processo di produzione dell'energia elettrica. Il raggiungimento di percentuali significative di veicoli a zero emissioni allo scarico apporta indubbiamente un vantaggio in ambito urbano, dove il superamento dei limiti delle polveri sottili rappresenta un fenomeno che si verifica per un numero sempre maggiore di giorni in svariate città (European Environment Agency, "Air quality in Europe", EEA Report No 13/2017, Ottobre 2017). Nonostante ciò, è necessario considerare la modalità di produzione dell'eventuale surplus di energia elettrica, richiesto dalla diffusione dei veicoli elettrici, ed il relativo impatto in termini ambientali. Inoltre, bisogna valutare attentamente quanto e come la variazione di domanda di energia derivante da una parziale elettrificazione del trasporto pubblico e privato possa gravare sia in termini di costi di produzione, che in termini di carichi sulla rete di distribuzione esistente. Per questo motivo è fondamentale riuscire ad ottenere una rappresentazione aggiornata e puntuale della richiesta di energia dovuta alla presenza di veicoli elettrici, che tenga conto dello specifico orario e della particolare zona in cui tale richiesta è effettuata.

La road-map in ambito energetico stabilita dalla Commissione Europea al 2050³ prevede obiettivi graduali per la riduzione di emissioni di gas serra, per il miglioramento dell'efficienza energetica e per il raggiungimento di quote sempre più elevate di produzione di energia da fonti rinnovabili. Pertanto, l'ipotesi di abbinare le future stazioni di ricarica dei veicoli elettrici (soprattutto se in corrispondenza degli eventuali parcheggi di scambio col trasporto pubblico locale), a sistemi di produzione di energia mediante pannelli fotovoltaici è una proposta in linea con tale visione sia da un punto di vista ambientale che da un punto di vista energetico. In questo modo, infatti, oltre ad incidere positivamente sulla quota di produzione di energia da fonti rinnovabili, si potrà assicurare anche un maggior equilibrio del sistema, attraverso un approccio di tipo vehicle-to-grid in cui i veicoli elettrici in sosta possono accumulare l'energia prodotta dai pannelli e allo stesso tempo scambiare energia con la rete di distribuzione, assumendo la funzione di "stabilizzatori" della rete stessa. Una gestione intelligente della ricarica garantirà al contempo le necessità degli utenti e la stabilità della rete, coordinando in maniera ottimizzata sia i tempi di ricarica, sia l'eventuale cessione di energia da parte dei veicoli stessi in caso di superamento di determinati picchi di richiesta.

A tal proposito può risultare di grande rilevanza disporre di misure geo-referenziate della radiazione solare e, di conseguenza, delle stime puntuali dell'energia che può essere generata con l'installazione in loco di pannelli fotovoltaici.

Lo scopo è di fornire un profilo (orario) della radiazione solare per le diverse zone della città cui si ipotizza di installare delle colonnine di ricarica abbinata a sistemi di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili (e.g. pannelli fotovoltaici) ed, eventualmente, a sistemi di accumulo.

4.1 La stima di dati di radiazione solare

L'attuale promozione di politiche di miglioramento dell'efficienza energetica nei diversi contesti del settore civile e industriale può essere favorita dalla disponibilità di banche dati di radiazione solare adeguate.

ENEA vanta un'esperienza pluriennale nell'ambito della stima, l'elaborazione e l'archiviazione di dati di radiazione solare riferiti all'intero territorio nazionale. La principale metodologia utilizzata per la stima della radiazione solare si basa sull'elaborazione delle immagini satellitari di copertura nuvolosa fornite da EUMETSAT - *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*⁴. Tali immagini sono acquisite ogni 15 minuti in un intervallo dello spettro elettromagnetico che cade quasi per intero nella banda visibile (500 ÷ 900 nm) e garantiscono una risoluzione spaziale di circa 1 x 1.5 km². L'impiego di immagini satellitari ha il grosso vantaggio di consentire una caratterizzazione su larga scala spaziale che l'utilizzo di stazioni di misura non è in grado di assicurare, a meno di non aumentarne consistentemente il numero, con conseguente aggravio di costi relativi all'acquisto, all'installazione ed alla manutenzione.

Le immagini satellitari di copertura nuvolosa forniscono una misura del coefficiente di riflessione (*albedo*) della superficie riflettente, come uno strato di nubi in caso di cielo coperto, oppure il suolo terrestre in

³ http://europa.eu/european-union/topics/energy_it

⁴ <http://www.eumetsat.int/website/home/index.html>

condizioni di cielo sereno. Poiché in assenza di nubi il comportamento dell'atmosfera ai fini dell'attenuazione dei raggi solari che l'attraversano è ben caratterizzato, la variabilità della radiazione che giunge al suolo, una volta tenuto conto della posizione relativa fra Sole e Terra nei diversi periodi dell'anno e nei diversi momenti del giorno, è attribuibile in prima approssimazione alla minore o maggiore quantità di nubi presenti.

Gli algoritmi messi a punto in ENEA, basati su appropriati modelli di comportamento dell'atmosfera, consentono di stimare il dato di radiazione 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.

La presenza dell'atmosfera intorno alla terra fa sì che solo una parte della radiazione giunga indenne al suolo. Tale frazione viene definita come radiazione solare diretta su piano orizzontale. Alcuni raggi solari, infatti, possono essere in parte assorbiti o deviati a causa delle interazioni con le molecole dell'atmosfera stessa (come il vapore acqueo, gli aerosol e le nubi). La frazione di radiazione solare che, a seguito dell'interazione con l'atmosfera terrestre, viene deviata verso il suolo è detta Radiazione Diffusa su piano orizzontale. Più in generale si può pensare all'atmosfera terrestre come un "attenuatore" dell'irradianza extraatmosferica che giunge dal sole:

$$I = K_T I_0 = I_b + I_d = I_{bn} \cos \theta_z + I_d \quad (1)$$

dove:

- I è l'irradianza solare globale sul piano orizzontale (Global Horizontal Irradiance, GHI);
- I_0 è l'irradianza extraatmosferica su piano orizzontale;
- K_T è il coefficiente di trasmissione globale dei raggi solari attraverso l'atmosfera;
- I_b è l'irradianza solare diretta sul piano orizzontale;
- I_d è l'irradianza solare diffusa sul piano orizzontale (Diffuse Horizontal Irradiance, DHI);
- I_{bn} è l'irradianza solare diretta sul piano normale (Direct Normal Irradiance, DNI);
- θ_z è l'angolo zenitale, ovvero l'angolo che i raggi solari incidenti formano con la normale alla superficie orizzontale.

Nelle precedenti definizioni le irradianze rappresentano delle potenze (incidenti) per unità di superficie riferite a un dato istante. Per intervalli finiti, ad esempio orari, giornalieri, mensili o annui, è possibile derivare per integrazione l'energia incidente per unità di area (irradiazione) per l'intero intervallo temporale considerato.

Per maggiori dettagli sulla modellistica adottata in ENEA per il calcolo dei diversi termini di equazione (1) si può far riferimento a ⁵ e ⁶.

4.2 Le mappe ENEA di radiazione solare

La caratterizzazione del fenomeno radiativo al suolo per una specifica località necessita la disponibilità di serie storiche relative ad un intervallo temporale sufficientemente lungo, tipicamente serie di dati pluriannuali. Ad esempio, per effettuare delle analisi che siano significative da un punto di vista climatico, un solo ciclo di variabilità stagionale coperto da un anno di dati non è sufficiente. Inoltre, maggiore è la frequenza di registrazione dei dati (partendo da dati orari, fino ad arrivare anche a frequenze molto elevate di un dato ogni minuto), maggiori saranno i dettagli della variabilità meteorologica derivabili nel corto

⁵ F. Spinelli, E. Cogliani, A. Maccari, M. Milone, "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, 2007.

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

⁶ SolarItaly – Atlante italiano della radiazione solare, sito ENEA per il calcolo e la previsione della radiazione solare. <http://www.solaritaly.enea.it>

periodo. Infine, per rappresentare appropriatamente una regione geografica su scala provinciale o regionale, le serie storiche pluriennali dei dati di radiazione devono riguardare un numero di siti sufficiente a coprire in maniera uniforme il territorio in esame.

Come si è visto in precedenza, le immagini satellitari di copertura nuvolosa costituiscono il punto di partenza di tutto il processo di stima della radiazione solare. Grazie ai modelli sopra menzionati, i valori (pixel) registrati nelle immagini satellitari sono in primo luogo trasformati in dati di copertura nuvolosa e, successivamente, convertiti in dati d'irradianza. Il risultato del calcolo è rappresentato da nuove mappe di irradianza globale, diffusa orizzontale e diretta normale. A partire dall'irradianza per ogni quarto d'ora, si possono infine ricavare le mappe d'irradianza media oraria e d'irradiazione giornaliera, giornaliera media mensile e infine annua.

Rispetto alle misure effettuate a terra, le stime ottenute mostrano scarti del 4-8% sul dato giornaliero medio mensile della radiazione globale su piano orizzontale. Ovviamente scarti più grandi sono possibili per i dati giornalieri (fino al 10%) e per i dati orari (fino 20%).

Attualmente, il patrimonio delle mappe digitali geo-referenziate della radiazione solare, disponibili in ENEA, copre l'intero periodo 2006-2016, con frequenza di una mappa ogni quindici minuti. Tali archivi trovano una naturale utilità nella stima del potenziale radiativo solare di un determinato territorio al fine dell'installazione di impianti di potenza in grado di sfruttare direttamente tale fonte energetica.

Per specifiche applicazioni, quali la progettazione di impianti solari o fotovoltaici, può essere conveniente realizzare un anno tipico di dati che sia rappresentativo dell'intera serie pluriennale disponibile. Si tratta di una collezione di 8760 (= 365 x 24) dati orari di radiazione solare (globale e diffusa orizzontali e diretta normale), estratta dalla serie pluriennale disponibile ottenuta scegliendo, per ciascuno dei dodici mesi, l'intero mese di dati dell'anno (fra quelli presenti nella serie) che più si avvicina alla media pluriennale. Il "grado di vicinanza" è stabilito sulla base di appropriati criteri [2, 3].

L'anno tipico sarà costituito giustapponendo in sequenza i dati dei dodici mesi scelti in modo che il valor medio mensile di radiazione del mese prescelto sia prossimo a quello medio mensile dell'intera serie pluriennale di partenza e, al contempo, le sequenze orarie e giornaliere presenti nell'anno tipico riproducano in modo sufficientemente realistico gli andamenti effettivamente riscontrabili nei dati registrati.

In Figura 5 è riportata una rappresentazione della radiazione globale su piano orizzontale per l'area di studio considerata che copre buona parte della provincia di Roma.

I valori medi di irradiazione sono riferiti al periodo 2006-2016. Il numero di punti di "rilevazione" è pari a 296. L'area di riferimento è compresa approssimativamente tra 41°6.5' e 41°33.3' latitudine Nord e tra 11°58.4' e 12°50.3' di longitudine Est da Greenwich.

La scala di colori codifica l'intensità della radiazione in funzione della posizione geografica e, dunque, potenzialmente, la quantità di energia elettrica producibile da un impianto fotovoltaico in una determinata zona.

Dalla figura emerge chiaramente come la variazione dei valori di radiazione non sia tale da essere determinante nella scelta di un eventuale posizionamento delle stazioni di ricarica. Tale variazione, sebbene poco marcata al livello provinciale, può diventare significativa su scala regionale o nazionale. Ad esempio le differenze medie annue nei valori di radiazione globale tra due città come Roma e Milano sono dell'ordine del 30%.

Ulteriori considerazioni possono essere ottenute da Figura 6 e Figura 7. In particolare in Figura 6 è possibile notare come le radiazioni solari diretta, diffusa e globale siano delle grandezze con una variabilità fortemente stagionali e come l'andamento reale delle radiazioni si discosti da una "campana ideale" a causa, essenzialmente, della differente copertura nuvolosa presente nei vari periodi dell'anno.

In Figura 7 è possibile invece osservare l'andamento della radiazione globale e la relativa variabilità.

Questi aspetti sono di fondamentale importanza nell'istallazione di impianti fotovoltaici in quanto permettono di analizzare e prevedere la variabilità di produzione dell'energia elettrica dell'impianto in funzione della zona considerata, della copertura nuvolosa e dello specifico periodo dell'anno (si noti a tal proposito come nei mesi invernali, l'energia media giornaliera sia circa un quarto della corrispondente dei mesi estivi).

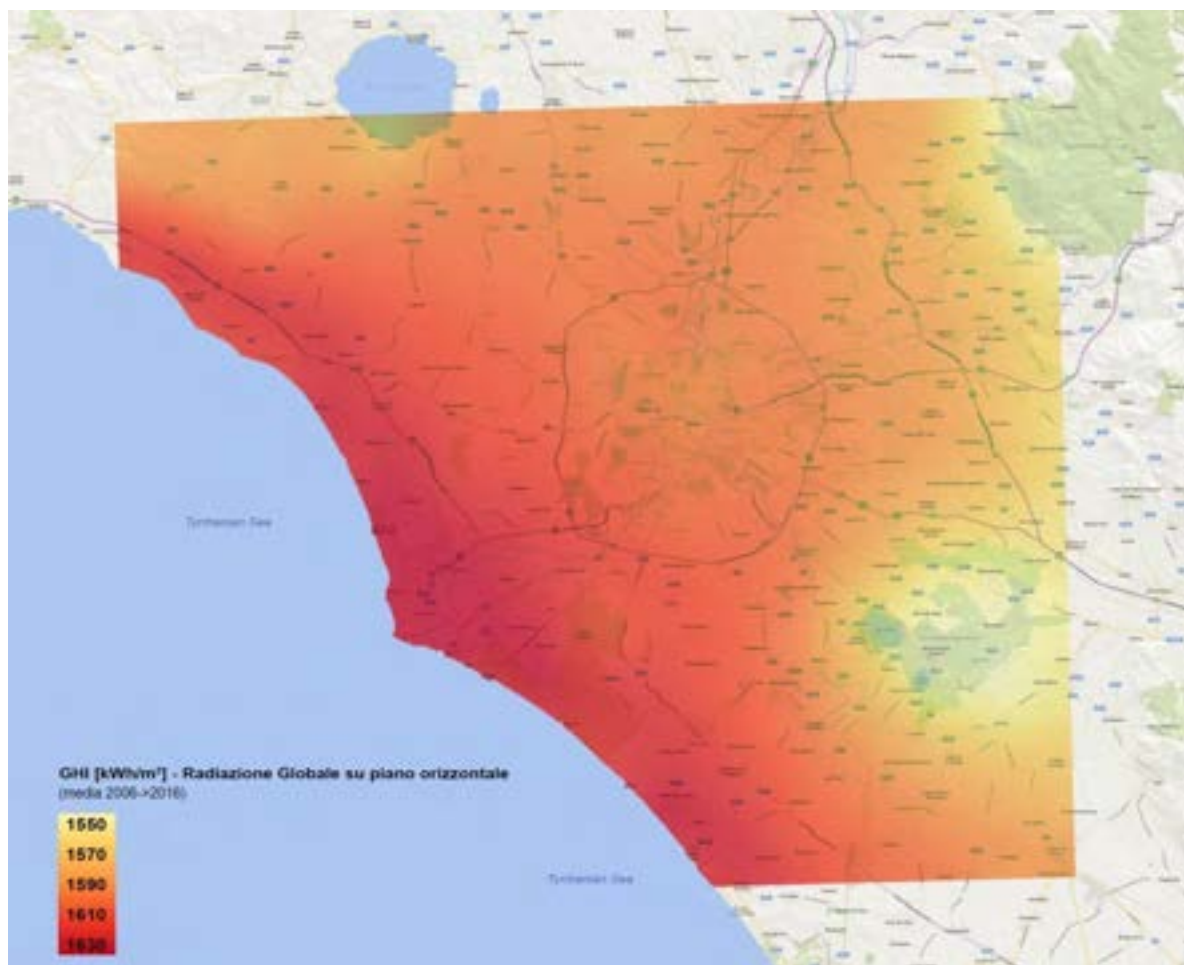


Figura 5: Radiazione globale su piano orizzontale (GHI) nell'area di studio

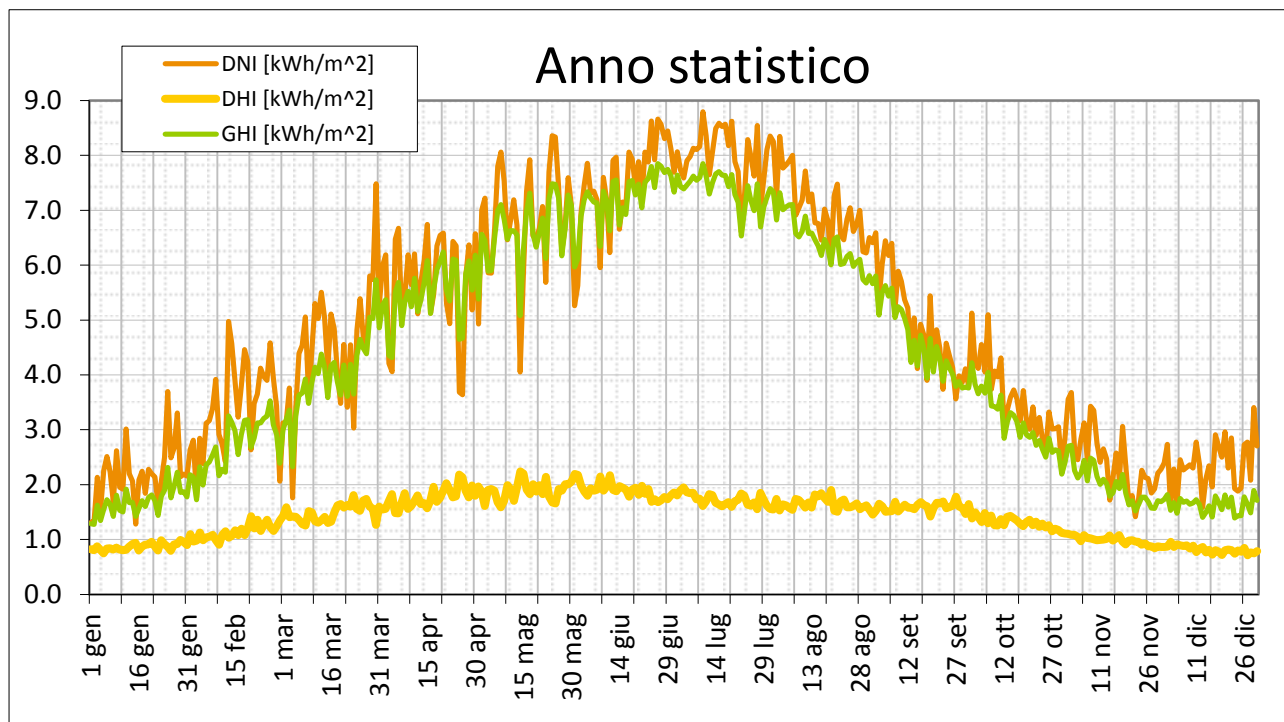


Figura 6: Andamento medio della radiazione solare diretta, diffusa e globale

In figura sono riportati i valori medi della radiazione solare diretta normale (DNI), la radiazione diffusa su piano orizzontale (DHI) e la radiazione globale su piano orizzontale (GHI) calcolate nel periodo 2006-2016. Gli andamenti si riferiscono alle coordinate 41°47.0' latitudine Nord, 12°21.6' longitudine Est da Greenwich, corrispondenti alla zona di Acilia, Roma.

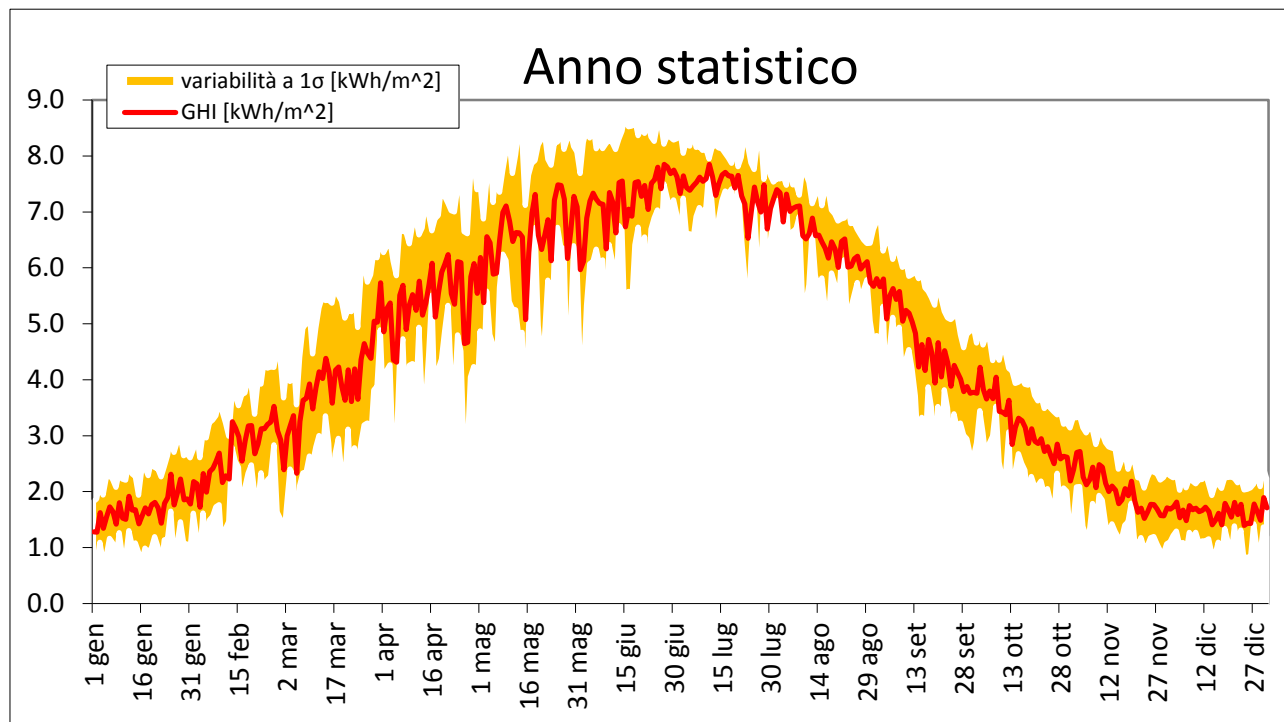


Figura 7: Variabilità della radiazione solare globale (GHI)

In figura sono riportati il valore medio della radiazione globale su piano orizzontale (GHI) e la relativa variabilità (1 deviazione standard) calcolati nel periodo 2006-2016. Gli andamenti si riferiscono alle coordinate 41°47.0' latitudine Nord, 12°21.6' longitudine Est da Greenwich, corrispondenti alla zona di Acilia, Roma.

4.3 Un esempio applicativo

Come detto in precedenza, una possibilità concreta di applicazione dei precedenti modelli nell'ambito dei futuri scenari di elettrificazione della mobilità riguarda l'abbinamento delle future stazioni di ricarica dei veicoli elettrici a sistemi di produzione di energia da pannelli fotovoltaici, con particolare riferimento ai parcheggi di scambio col trasporto pubblico locale.

L'energia elettrica E_{pv} ottenibile dall'installazione di un impianto fotovoltaico pv può essere ricavata mediante le seguenti equazioni [4, 5]:

$$E_{pv} = I_i \cdot S \cdot \eta_{conv} \cdot \eta_{pv} \cdot \eta_{inv} \quad (2)$$

$$\eta_{pv} = (1 - L_{pv}) \quad (3)$$

$$S \cdot \eta_{conv} = \frac{P^{(nom)}}{I_{STC}} \quad (4)$$

$$E_{pv} = I_i \cdot \frac{P^{(nom)}}{I_{STC}} \cdot (1 - L_{pv}) \cdot \eta_{inv} \quad (2) + (3) + (4) \rightarrow (5)$$

dove:

- I_i è l'irradiazione solare incidente esprimibile in $kWh\ m^{-2}$ riferita allo specifico periodo di tempo considerato (1 giorno, 1 mese, 1 anno, ecc.);
- S è la superficie totale coperta dai moduli fotovoltaici del generatore pv esprimibile in m^2 ;
- η_{conv} è l'efficienza di conversione della cella che dipende dalla composizione (drogaggio) e dalle modalità costruttive del materiale di cui è costituita;
- η_{pv} è l'efficienza del sistema in relazione alle perdite L_{pv} dovute alla temperatura, alle ottiche, ai cavi, ecc.;
- η_{inv} è l'efficienza dell'inverter;
- $P^{(nom)}$ è la potenza nominale di pv (esprimibile in kW) ovvero la potenza elettrica che l'insieme dei moduli fotovoltaici di pv eroga quando è sottoposto ad un irraggiamento solare pari a $1kW\ m^{-2}$, alla temperatura di $25^\circ C$ e Air Mass⁷ 1.5; nella (4) la quantità $I_{STC} = 1kW\ m^{-2}$ ha significato di termine di normalizzazione e compare a denominatore.

Consideriamo a titolo di esempio il parcheggio di Acilia, a cui si è fatto riferimento in Figura 2 e Figura 3, che copre approssimativamente una superficie di $12'500\ m^2$. Per tale superficie, con lo standard tecnologico attuale, sarebbe possibile installare un impianto fotovoltaico di potenza nominale pari a 2.5 MW, che corrisponde ad un'efficienza di conversione $\eta_{conv} \approx 0.2$. Inoltre, considerando sempre lo stato attuale della tecnologia, si può porre per i valori di efficienza del sistema e dell'inverter rispettivamente: $\eta_{pv} \approx 0.85$ e $\eta_{inv} \approx 0.95$.

Applicando l'equazione (5) e, tenuto conto dei relativi valori di radiazione solare (vedi ad es. Figura 3), si ricava un valore medio annuo di energia elettrica prodotta pari a:

$$E_{pv} = 1617 \frac{kWh}{m^2} \cdot \frac{2.5\ MW}{1\ kW\ m^{-2}} \cdot 0.85 \cdot 0.95 = 3.264\ GWh$$

⁷ L'Air Mass (AM) è un indicatore della quantità di atmosfera che la radiazione solare deve attraversare per giungere al suolo terrestre. Per definizione si indica AM0 (AM=0) lo spettro solare nel vuoto, prima che attraversi l'atmosfera terrestre. AM è pari a 1 quando il sole è allo zenith, cioè a 90° sopra l'orizzonte, e maggiore di 1 in tutti gli altri casi.

Ipotizzando, a titolo di esempio, che un veicolo elettrico compia mediamente quattro ricariche a settimana da 15 kWh ciascuna, il precedente potenziale energetico sarebbe in grado di sopperire mediamente al fabbisogno annuo di ricarica di circa 1'046 veicoli elettrici.

Dato che il processo di produzione di energia da fotovoltaico è un fenomeno "intermittente" e non facilmente prevedibile sul breve periodo, risulta di fondamentale importanza affiancargli un sistema intelligente (quindi anche programmabile e regolabile da remoto) in grado di ottimizzare la distribuzione e gestione dell'energia stessa, evitando gli sprechi e i sovraccarichi e bilanciando in maniera efficiente la domanda e l'offerta.

A conferma di ciò, oggi c'è un crescente interesse verso quei sistemi di produzione e consumo integrati con i sistemi di accumulo, la cui presenza garantisce diversi vantaggi quali la massimizzazione dell'autoconsumo o il peak-shaving.

Al contempo, lo sviluppo esponenziale di tutta una serie di sistemi di automazione, controllo e scambio dati consente ulteriori possibilità di efficientamento. Ne sono un esempio l'ottimizzazione della ricarica in funzione delle esigenze dell'utente e dei carichi sulla rete, la negoziazione delle tariffe in tempo reale, il load-leveling della rete mediante lo scambio di energia con le auto in ricarica che fungono da accumuli locali (vehicle-to-grid).

È chiaro che, più in generale, l'avanzamento dell'elettrificazione della mobilità non può prescindere dallo sviluppo di un sistema di Energy Management in grado di favorire la comunicazione bidirezionale tra utenti e utility e che combini sostenibilità, sicurezza e competitività economica.

In un sistema elettrico sempre più caratterizzato da tante micro-centrali distribuite, il gestore della rete dovrà essere in grado di esaudire in tempo reale la richiesta di consumo di più utenti connessi, agendo come un unico sistema intelligente.

5 Modellazione degli scenari di mobilità elettrica

Come più volte rimarcato l'idea centrale della ricerca è di sviluppare un ambiente di simulazione che consenta di riprodurre su scala urbana scenari futuri di penetrazione di veicoli elettrici nel parco auto circolante e nelle flotte di autobus utilizzate per il trasporto pubblico locale.

La simulazione è basata su un approccio a microscala atto a rappresentare individui eterogenei e a riprodurre l'intera sequenza di spostamenti, soste e ricariche effettuati da ogni singolo veicolo elettrico in un determinato periodo di tempo (giorno, settimana, mese) nell'area di applicazione.

Nella simulazione microscopica l'individuo interagisce con gli altri individui e con l'ambiente adattandosi in maniera appropriata alle modifiche della rete di infrastrutture di ricarica e a eventuali provvedimenti di gestione del traffico e della mobilità.

L'interazione tra i singoli individui è modellizzata per riprodurre le scelte di ricarica in caso di esubero di richieste presso stazioni accessibili pubblicamente. Il comportamento degli individui è modellizzato anche per lo studio di servizi di Smart Charging e VehicleToGrid.

Nella simulazione gli individui sono entità autonome rappresentate da una serie di attributi e algoritmi che ne definiscono il comportamento nelle scelte di viaggio (destinazioni, orari di partenza, tempi di sosta) e di ricarica (luogo, orario, tipologia e durata) necessarie a garantire la piena autonomia energetica del veicolo stesso.

Tra gli attributi principali che descrivono e caratterizzano l'individuo figurano la tipologia di veicolo in possesso (puramente elettrico o ibrido plug-in, il segmento di mercato) e la eventuale disponibilità di un posto auto per la ricarica domestica e/o presso il luogo di lavoro. Alla tipologia di veicolo sono associate informazioni sui consumi specifici e sulla capacità della batteria. Il consumo energetico è funzione di più variabili: la lunghezza del viaggio, la velocità media, la temperatura ambientale, la pendenza (nel caso degli autobus) e il rendimento della batteria in fase di scarica.

Nella simulazione degli autobus il programma dei viaggi giornalieri e settimanali è fissato dal programma di esercizio del TPL che stabilisce per ogni linea i percorsi di andata e ritorno, gli orari delle singole corse, i tempi di arrivo alle fermate e la durata della sosta al capolinea. Per gli autobus lo schema di ricarica più comunemente utilizzato prevede una ricarica completa delle batterie ai depositi e ricariche parziali ai capolinea durante la sosta per ripristinare l'energia spesa durante l'ultima corsa.

5.1 Luoghi e comportamenti per la ricarica

Ipotizzare in questo momento quello che dovrebbe diventare lo scenario futuro dei comportamenti di ricarica adottati, non è comunque un compito facile.

Tale valutazione sarà ovviamente condizionata dall'evoluzione tecnologica che vedrà protagonista l'auto elettrica nei prossimi anni e la sua interazione con i futuri schemi di produzione e distribuzione dell'energia. Per questa ragione l'ambiente di simulazione è stato ideato e progettato per garantire una maggiore flessibilità e adattabilità ai possibili scenari tecnologici che potranno realizzarsi e ai conseguenti comportamenti di ricarica che si potranno innescare.

L'ambiente di simulazione è stato pertanto predisposto per rappresentare le diverse tipologie di utenti ed esigenze di ricarica: da quelli solitamente abitudinari nei riguardi delle scelte di mobilità a quelli più imprevedibili con percorrenze e destinazioni di viaggio più varie e meno ripetitive.

Tutti gli studi sul campo condotti finora sono concordi nel sottolineare che le operazioni di ricarica delle auto elettriche avvengono abitualmente di sera, nei posti auto privati e condominiali, e si prevede che anche in futuro gran parte delle auto continuerà ad utilizzare questa modalità, richiedendo solitamente due o tre ricariche lente la settimana.

Ciononostante la diffusione delle auto elettriche dovrà essere accompagnata dalla predisposizione di un certo numero di punti di ricarica pubblicamente accessibili per un'eventuale ricarica complementare e limitare l'ansia di rimanere senza carica nella batteria.

I punti di ricarica pubblica possono essere alimentati anche con potenze dell'ordine di qualche decina di kW per la ricarica rapida delle auto elettriche al fine di poter soddisfare utenti ed esigenze di tipo occasionali. Le stazioni di ricarica con accesso pubblico sono solitamente installate in aree pubbliche, in particolare su strade e piazze, o in aree private con accesso pubblico, quali centri commerciali, cinema, parcheggi di interscambio della metropolitana, ecc..

Salvo che per gli utenti che non dispongono di un posto auto con prese elettriche, la maggior parte delle ricariche dell'auto avverrà presso l'abitazione, con logiche molto simili a quelle utilizzate per il proprio smart phone.

Il secondo luogo dove probabilmente l'utente preferirà effettuare la ricarica dell'auto, sarà sicuramente quello di lavoro dove l'auto in genere staziona per lunghi periodi compatibili anche con ricariche a bassa potenza.

Questo ovviamente se il datore di lavoro rende disponibile uno o più sistemi di ricarica nell'area di parcheggio aziendale. La stessa infrastruttura può servire inoltre per ricaricare la flotta elettrica aziendale, conseguendo così i maggiori vantaggi della mobilità elettrica per l'impresa.

La ricarica presso il luogo di lavoro può rappresentare inoltre una valida opzione per gli utenti che non dispongono del box/posto auto presso la propria abitazione.

Si può supporre che ciascun individuo opererà la scelta più opportuna sul modello del veicolo e sul sistema di ricarica in base alle reali esigenze di uso e percorrenza media giornaliera

L'Idaho National Laboratory dell'Energy Department degli Stati Uniti⁸ ha recentemente condotto uno studio per ricavare informazioni sull'uso reale delle auto elettriche e sulle scelte di ricarica.

A supporto dello studio è stata effettuata una campagna sperimentale per la raccolta di dati e informazioni sull'uso di un campione di auto elettriche private circolanti in diverse città degli Stati Uniti per una durata di circa 2 anni. La campagna sperimentale ha riguardato in particolare oltre 4000 auto Nissan Leaf, puramente elettriche e con una percorrenza media annua intorno a 15.000 km, e 1800 auto Chevrolet Volt, con tecnologia Range Extender (vale a dire ad autonomia estesa) e con una percorrenza media annua di circa 19.500 km di cui circa il 74% in modalità puramente elettrica.

Ricordiamo che le auto elettriche ad autonomia estesa è una particolare categoria di auto ibrida di tipo plug-in caratterizzata da un powertrain in serie in cui il ruolo del motore a combustione interna è soltanto quello di alimentare la batteria.

Diversamente, le auto ibride plug-in con powertrain in parallelo, hanno invece il motore a combustione interna con un ruolo preponderante nell'assicurare la propulsione ed è quindi collegato alle ruote fornendo coppia e potenza esattamente come avviene su una vettura tradizionale.

Ritornando allo studio effettuato dall'Idaho National Laboratory, i risultati mettono in risalto che nonostante i punti di ricarica pubblici o presso il posto di lavoro siano utilizzati per la ricarica dei veicoli, le scelte di ricarica più frequenti sono effettuate presso i punti di ricarica domestici (84% per le auto Nissan Leaf e 87% per le auto Chevrolet Volt).

Per entrambe le tipologie di auto le ricariche non domestiche sono effettuate per lo più presso il luogo di lavoro. Per il gruppo di utenti che hanno a disposizione la ricarica sia a domicilio che presso il luogo di lavoro risulta che solo il 4% delle ricariche avviene in punti di ricarica diversi da quelli disponibili (57% a casa e 39% presso il luogo di lavoro). Per le auto Nissan Leaf solo l'8% delle ricariche è stato effettuato presso punti ricarica veloce.

Lo studio evidenzia inoltre che il numero medio di ricariche effettuate giornalmente è pari a 1,1 e 1,5 rispettivamente per le auto Nissan Leaf e le auto Chevrolet Volt; in Figura 8 sono riportati gli istogrammi di frequenza per classe di SOC all'inizio della ricarica (a sinistra riferito alle auto Chevrolet Volt, a destra alle auto Nissan Leaf).

Come si può facilmente osservare le scelte di ricarica sono piuttosto differenziate per le due tipologie di auto: le ricariche delle auto Chevrolet Volt sono di frequente effettuate con la batteria quasi scarica,

⁸ Idaho National Laboratory. 2015. Plug-in Electric Vehicle and Infrastructure Analysis. Viewed June 2, 2017: <http://avt.inel.gov/pdf/arra/ARRAPEVnInfrastructureFinalReportHqItySept2015.pdf>

mentre per le auto Nissan Leaf circa 70% delle ricariche viene effettuato con un SOC compreso tra il 30 ed 70%.

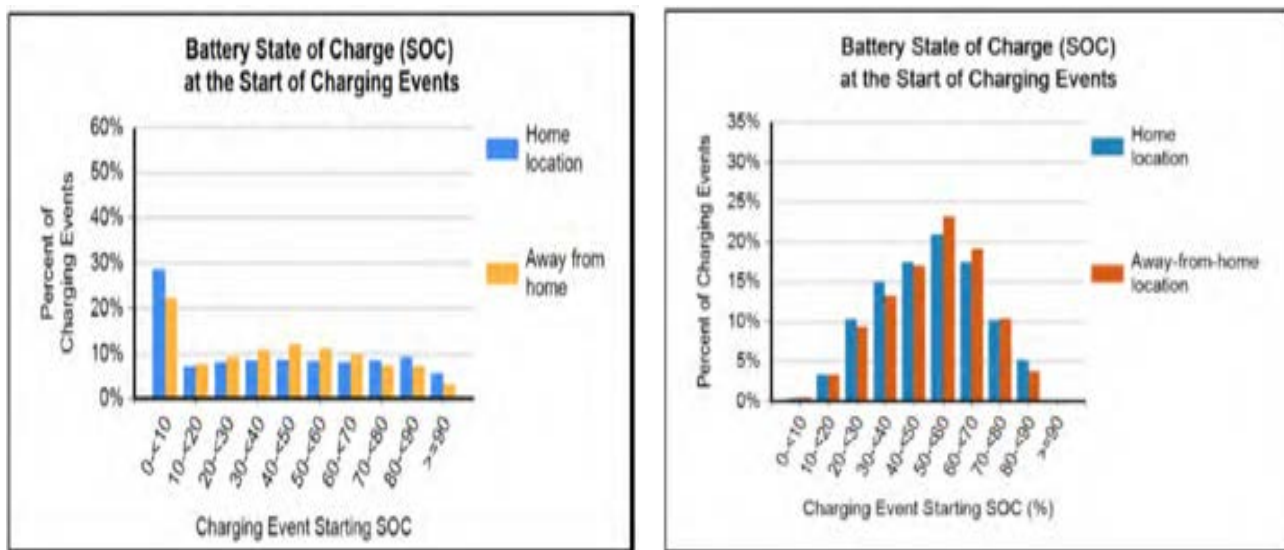


Figura 8: Istogramma delle frequenze per classe di SOC all’inizio della ricarica per la Volt e la Leaf

Il diverso comportamento di ricarica osservato per le due tipologie di veicoli è sostanzialmente legato al vantaggio offerto dalla tecnologia Range Extender di poter estendere l’autonomia del veicolo fino a valori paragonabili a quelli delle auto tradizionali e, di conseguenza, di minimizzare l’ansia d’autonomia limitata. La Chevrolet Volt è in particolare equipaggiata con una batteria di limitata capacità (60 km) e un motore a combustione che funge da generatore di energia per la ricarica della batteria nei momenti di necessità.

Le operazioni di ricarica e le condizioni di lavoro influiscono in modo sostanziale sul ciclo di vita della batteria che è il componente più costoso del veicolo elettrico. Gli effetti di deterioramento delle batterie si ripercuotono sulla perdita di capacità immagazzinata, su un aumento dell’impedenza interna e sulla riduzione della potenza erogata.

Per quanto riguarda la vita utile, le nuove batterie agli ioni di litio presentano un notevole miglioramento rispetto alle precedenti batterie (piombo, Ni-Cd e Ni-Mh).

Miglioramento che non consiste tanto in un aumento del numero di cicli di carica/scarica effettuabili, quanto nel fatto che è sostanzialmente assente il cosiddetto “effetto memoria”, che nella pratica riduce fortemente la vita utile delle batterie tradizionali.

Com’è noto le precedenti batterie al Piombo dovevano essere scaricate completamente prima di sottoporle ad un nuovo ciclo di carica per evitare l’effetto memoria dello stato di carica precedente al quale erano soggette e di conseguenza per non compromettere le prestazioni delle batterie stesse.

Le batterie agli ioni di litio, invece, non hanno questo inconveniente e permettono di effettuare realmente tutti i cicli di carica/scarica previsti in specifica, indipendentemente dalle condizioni di carica in cui il ciclo viene iniziato.

Va comunque sottolineato che un ciclo di carica non corrisponde sempre a mettere una batteria attaccata a una presa di corrente, ma solo quando la batteria è completamente scarica. Questo sta a significare che se consumiamo il 30% della batteria e la facciamo ricaricare non equivale ad un ciclo di ricarica completo; per portarla ad esaurimento dobbiamo scaricare il 70% rimanente, che può essere fatto in un’unica soluzione o in più ricariche parziali di minore entità, sino ad arrivare al 100%.

Altri fattori che influenzano la vita utile delle batterie sono la tipologia e la profondità del processo di scarica. Frequenti scariche profonde portano infatti ad un aumento della resistenza interna e a una diminuzione della capacità utile, inoltre possono aumentare il tasso di guasto e avere come conseguenza l’invecchiamento prematuro delle singole celle.

In definitiva le batterie agli ioni di litio preferiscono delle ricariche frequenti e parziali, piuttosto che cicli di carica e scarica completi che anzi dovrebbero essere evitati quando è possibile.

Anche la corrente di carica e di scarica influisce in modo sostanziale sul ciclo di vita di una batteria. Eccessive correnti di carica e condizioni di scarica estreme, hanno un effetto negativo sulla batteria.

La temperatura ambientale ha anche una certa influenza sulla vita utile delle batterie; diminuzioni di temperatura portano in particolare alla riduzione della capacità utile della batteria. Ad esempio a 10°C si ha il 95% della capacità nominale, a 0°C l'83% e a -10°C si ha il 70%.

Anche le temperature elevate influenzano negativamente le prestazioni delle batterie e ne riducono la vita utile, tuttavia per questo problema sono state introdotte diverse strategie di raffreddamento.

Le scelte di ricarica dei singoli utenti possono essere inoltre guidate e ottimizzate per evitare il sovraccarico della rete e favorire il bilanciamento ottimo dei carichi della rete di distribuzione.

In caso contrario si ha la cosiddetta "Dumb Charge" in cui la carica della batteria inizia dal momento della sua connessione alla rete e dura per il tempo necessario al suo completamento, a meno che l'auto non sia disconnessa prima.

Questa modalità di ricarica potrebbe risultare impraticabile in quanto gran parte delle automobili verrebbe ricaricata nelle ore di rientro a casa dal lavoro in concomitanza con il picco serale di domanda di energia elettrica del settore domestico. In questo caso anche un numero esiguo di veicoli elettrici potrebbe creare un sovraccarico locale eccessivo sulla rete elettrica.

Per una migliore gestione dei carichi della rete è possibile introdurre delle tariffe ridotte per incentivare gli utenti a programmare le ricariche dei veicoli durante le ore di morbida della domanda di energia per uso domestico.

Ancora più evolute ai fini della gestione ottima dei carichi risultano le tecnologie Smart Charging e VehicleToGrid. Nel caso della tecnologia Smart Charging la ricarica è controllata direttamente dall'operatore in funzione dello stato del sistema elettrico e delle esigenze di ricarica di ciascuna automobile. La tecnologia Vehicle-to-Grid permette inoltre di utilizzare le batterie dei veicoli elettrici, privati e pubblici, quando questi sono fermi per immettere energia in rete, garantendo una migliore gestione dei picchi di domanda di energia elettrica.

5.2 Configurazione della rete di infrastrutture di ricarica

Una moderna rete di infrastrutture di ricarica è costituita da diversi tipi di dispositivi di ricarica installati presso aree private e pubbliche, classificabili sulla base della capacità di erogazione dell'energia.

I dispositivi di ricarica sono solitamente integrati con sistemi di comunicazione con l'utenza, sistemi di pagamento e trasmissione dati, tecnologie per il controllo in remoto delle stazioni e la gestione dei picchi di domanda, ma anche con pensiline dotate di impianti fotovoltaici e soluzioni evolute per l'accumulo di energia.

Un aspetto rilevante per la simulazione delle scelte di ricarica e, conseguentemente, della dinamica spaziale e temporale dei carichi sulla rete elettrica è rappresentato dal servizio offerto dalla rete di punti di ricarica presenti nelle diverse zone dell'area di studio.

Come già evidenziato l'offerta di ricarica è costituita da più tipi di dispositivi ricarica ad uso pubblico e privato volti a soddisfare le molteplici esigenze connesse all'uso del veicolo da quelle sistematiche a quelle più occasionali.

La più diffusa tecnologia di ricarica dei veicoli elettrici è attualmente quella conduttiva con il cavo elettrico, anche se in un futuro poco lontano è prevedibile l'uso diffuso della tecnologia wireless (induttiva) senza connessioni via cavo.

Attualmente sono in studio tre diversi sistemi di ricarica wireless, in particolare: il sistema stazionario quando il veicolo è parcheggiato, il sistema semi-dinamico quando il veicolo è fermo al semaforo o alla fermata nel caso degli autobus del servizio TPL e, infine, il sistema completamente dinamico quando il veicolo si ricarica in moto mentre percorre strade e autostrade.

La ricarica in movimento è senza dubbio una vera e propria rivoluzione, attesa entro poco più di un decennio. Riguardo invece la ricarica induttiva stazionaria, tecnologicamente più matura alle basse potenze, l'Oak Ridge National Laboratory del Tennessee, con il quale collabora la casa automobilistica Toyota, ha

recentemente sviluppato un sistema di ricarica da 20 kW ad alta efficienza (intorno al 90 per cento) che avvicina le prestazioni delle colonnine a elevata capacità maggiormente diffuse. E all'orizzonte vi è già un'evoluzione a 50 kW.

Riguardo alla tecnologia di ricarica conduttiva sono attualmente disponibili più tipologie di sistemi di ricarica. In generale i sistemi di ricarica sono differenziati in base al tipo di corrente ricevuta dal veicolo (continua, alternata monofase e trifase), alla sua tensione e corrente massima, al tipo di connettore (presa/spina) e alle caratteristiche dell'eventuale presenza di comunicazione/controllo tra il veicolo e la stazione di carica.

La ricarica conduttiva può essere ottenuta connettendo direttamente il veicolo elettrico alla rete di alimentazione in corrente alternata (ricarica in AC).

Alle basse potenze il caricabatteria è solitamente integrato nel veicolo per effettuare la conversione della corrente alternata erogata dalla presa in corrente continua per le batterie. I caricabatteria integrati nei veicoli non sono tutti uguali, alcuni accettano potenze più alte (ad esempio 22 kW - 32A 400V), altri accettano potenze più basse (ad esempio 3,7 kW - 16A 230V).

La potenza effettiva a cui avviene la ricarica non dipende quindi solo dalla potenza della colonnina, ma anche dalla potenza massima accettata dal caricabatteria a bordo veicolo (tra le due, la più bassa determina la potenza della ricarica).

Alle alte potenze la ricarica viene effettuata utilizzando un carica batteria esterno al veicolo (ricarica in DC) che effettua la conversione della corrente alternata della rete nella corrente continua richiesta per le batterie. In questo caso la colonnina di ricarica contiene il caricabatteria, motivo per il quale queste colonnine sono decisamente più voluminose e pesanti rispetto alle colonnine che operano alle basse potenze.

5.2.1 Tipologie di dispositivi di ricarica conduttiva

I sistemi di ricarica possono essere distinti in lenti/slow (monofase o trifase), accelerati/quick (trifase), veloci/fast (in AC e in DC) e ultra veloci/very fast (in DC).

Nei sistemi lenti la ricarica può essere effettuata con potenza compresa tra 3 kW (16 A a 220 V) con allacciamento monofase e 7 kW con allacciamento trifase.

La ricarica cosiddetta lenta è particolarmente adatta per i luoghi in cui le auto sostano per lunghi periodi come, per esempio, i garage o i posti auto condominiali presso le abitazioni, i parcheggi presso il luogo di lavoro e i parcheggi delle flotte aziendali occupati per soste abitudinarie durante la notte o il giorno.

La ricarica lenta può inoltre essere una valida soluzione per i veicoli elettrici che effettuano soste di lunga durata nei parcheggi di scambio in prossimità delle fermate del TPL o delle stazioni metropolitane e ferroviarie. Oltre a soddisfare le esigenze primarie dell'utente dei veicoli elettrici la ricarica lenta è spesso sufficiente a garantire la percorrenza giornaliera effettuata da gran parte dei veicoli circolanti nelle aree urbane.

I sistemi di ricarica accelerata utilizzano invece una potenza superiore ai 7 kW e inferiore ai 22 kW (32 A a 400 V). Essi sono adatti per i luoghi di sosta breve tra i 30 minuti e le 3 ore, come nei complessi commerciali, nei cinema e nei ristoranti.

La ricarica accelerata è particolarmente adatta a soddisfare esigenze di una maggiore flessibilità nell'uso del veicolo durante il giorno e di estendere occasionalmente la percorrenza del veicolo oltre la disponibilità energetica disponibile in batteria.

Nei sistemi di ricarica veloce le potenze disponibili vanno dai 43 kW (16 A trifase a 400 V) in corrente alternata ai 50 kW (125 A a 400 V) in corrente continua. Nei sistemi di ricarica ultra veloci si utilizza invece una potenza di ricarica superiore ai 100 kW in corrente continua (200 A a 500 V).

I dispositivi di ricarica veloce e ultra veloce rispondono all'esigenza di effettuare la ricarica in tempi estremamente ridotti dell'ordine delle decine di minuti compatibile con la permanenza all'interno delle stazioni di servizio e di estendere l'utilizzo dei veicoli elettrici a percorrenze medio-lunghe.

La potenza di ricarica non è l'unico fattore che determina i tempi di ricarica. Ad essi concorrono altri due fattori. Il primo è la potenza massima accettata dal veicolo elettrico, alcuni veicoli accettano al massimo 3.7 kW, altri 7.4 kW, altri ancora arrivano a 22 kW. Il secondo è la dimensione del pacco batteria, come è facilmente intuibile i veicoli che hanno una batteria con maggiore capacità impiegano più tempo, mentre quelli con batteria più piccola impiegano meno tempo.

Mediamente una ricarica completa di una batteria richiede i seguenti tempi:

- 3,7 kW (16A 230V): 6-8 ore;
- 7,4 kW (32A 230V): 3-4 ore;
- 11 kW (16A 400V): 2-3 ore;
- 22 kW (32A 400V): 1-2 ore;
- >22 kW (ricarica veloce DC): 20-30 minuti.

Il posizionamento ottimale delle stazioni di ricarica veloce è importante sia in ambito urbano, per ricariche immediate non programmate sul percorso cittadino, che in ambito extra-urbano, tipicamente sulle arterie di collegamenti, per poter garantire la fruibilità della mobilità elettrica sulle lunghe percorrenze, quando l'autonomia della batteria non è sufficiente a soddisfare l'intero spostamento.

In ambito urbano la ricarica rapida/ultra rapida può garantire una maggiore flessibilità all'uso dei veicoli elettrici adibiti al servizio taxi o alla distribuzione delle merci.

Sempre in ambito urbano trovano applicazione i dispositivi di ricarica veloce per gli autobus elettrici impegnati sulle linee del TPL. Questi dispositivi utilizzano potenze superiori ai 150 kW (200 A a 400 V) in continua.

La ricarica veloce degli autobus è prevista principalmente ai capolinea durante la sosta programmata anche se in alcune applicazioni all'estero sono previste ricariche parziali anche alle fermate intermedie durante le operazioni di salita e discesa dei passeggeri.

Nello schema che prevede la ricarica solo ai capolinea è possibile approvvigionare l'autobus dell'energia necessaria a effettuare la corsa fino al successivo capolinea oppure a percorrere l'intero tragitto di andata e ritorno.

Va comunque rimarcato che la ricarica rapida dei veicoli può avere un impatto significativo sulla rete per la domanda addizionale di energia richiesta. Nel caso delle auto private la domanda è anche difficilmente prevedibile in termini di timing e profili di ricarica. La gestione dei picchi di domanda legati alla ricarica rapida è in parte arginabile predisponendo dei sistemi di accumulo di energia da sfruttare nei momenti critici o collegando le stazioni alle linee di media tensione.

Secondo la normativa IEC (International Electrotechnical Commission) sono ammessi 4 Modi differenziati di ricarica in funzione del regime (CA, CC), della corrente massima, del tipo di connettore e della presa/spina. In particolare:

- **Modo 1:** Ricarica lenta (6-8 h) a 16 A, (corrente alternata) ammessa solamente in ambiente domestico privato. Consiste nel collegamento diretto del veicolo elettrico alle normali prese di correnti senza il dispositivo denominato Control Box;
- **Modo 2:** Ricarica lenta (6-8 h) a 16 A, (corrente alternata) ammessa in ambiente domestico e pubblico. Sul cavo di alimentazione del veicolo è presente un dispositivo Control Box (Sistema di sicurezza PWM) che garantisce la sicurezza delle operazioni durante la ricarica. Le prese utilizzabili sono quelle domestiche o industriali fino a 32 A;
- **Modo 3:** Ricarica lenta (6-8 h) a 16 A o mediamente rapida (30 min – 1 h) a 63 A, 400V (Modalità con sistema di sicurezza PWM), ammessa in ambiente domestico e pubblico. La ricarica deve avvenire tramite un apposito sistema di alimentazione dotato di connettori specifici;
- **Modo 4:** Ricarica ultra rapida (5-10 min) in corrente continua fino a 200 A, 400 V, ammessa solamente in ambiente pubblico. Con questo sistema è possibile ricaricare i veicoli in alcuni minuti, il caricabatterie è esterno al veicolo.

In Italia, l'ENEL ha recentemente lanciato un consistente piano di realizzazione di infrastrutture di ricarica⁹. Il piano prevede un investimento compreso tra i 100 e i 300 milioni di euro per la realizzazione di 14 mila punti di ricarica entro il 2022. L'Enel realizzerà in particolare un sistema di ricarica all'avanguardia basato sulla presenza di quattro tipologie di stazioni di ricarica:

- **Box station**, per la ricarica domestica, composta da un contatore installato nel garage o box; permette di fare il carico di energia comodamente dal garage di casa (a 3 kW ricarica in 6/8 ore);
- **Pole station** è la colonnina installata in strada, in punti strategici per la mobilità opportunamente concordati con le amministrazioni locali (fino a 22 kW ricarica anche in un'ora);
- **Fast Recharge** è la colonnina a 43 kW in corrente alternata (ricarica in circa 30 minuti);
- **Fast Recharge Plus** garantisce una ricarica completa in 20-30 minuti e permette di ricaricare 3 veicoli contemporaneamente, a 22kW o 43kW in corrente alternata e a 50 kW in continua.

Circa l'80% dei punti di ricarica verrà installato nelle aree urbane, di cui il 21% nelle grandi aree metropolitane e il 57% nelle altre città, e il restante 20% circa a copertura nazionale, per garantire gli spostamenti di medio e lungo raggio, nelle zone extraurbane e nelle autostrade.

Inoltre l'ENEL ha finora siglato accordi¹⁰ con le maggiori case automobilistiche (tra cui Audi e Nissan, ndr) per far installare nel sistema operativo che viene montato sulle auto elettriche il software che Enel utilizza per fare lo smart-charging. Il software consente all'auto di parlare con la stazione di ricarica, ma permette anche di usare l'auto (molte sono connesse con sim card) come un centro di trasmissione per comunicare con qualsiasi stazione di ricarica, anche quelle in garage, e fornire servizi. Oggi il software può già far dialogare la colonnina con i pannelli solari installati sui tetti per dirottare l'energia sulla ricarica di un'auto invece che scaricarla in rete.

Progetti pilota e sperimentazioni sono già partiti negli Usa e in Danimarca¹¹

5.2.2 La modellazione dell'offerta di ricarica

Il disegno della rete di ricarica pubblica deve essere considerato parte integrante di una pianificazione integrata del trasporto urbano/metropolitano e regionale ed essere coerente con l'effettivo fabbisogno delle diverse realtà territoriali.

La dislocazione territoriale delle postazioni di ricarica pubblica deve assicurare una buona copertura e servire i principali poli attrattori 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'influencare il comportamento degli utenti nelle scelte di ricarica.

Fattori rilevanti per gli utenti nella scelta di ricarica sono lo stato di carica della batteria, la dislocazione dei punti di ricarica in prossimità del luogo di destinazione del viaggio e la durata della ricarica.

La durata della ricarica è in funzione della quantità di energia richiesta per ricaricare la batteria e della potenza effettivamente impegnata dal sistema di ricarica. In generale il sistema di ricarica si regola automaticamente al valore più basso tra la potenza della colonnina e la potenza del caricabatteria interno al veicolo. Va inoltre considerato che durante la fase di ricarica la potenza viene gradualmente ridotta all'aumentare del SOC in quanto diminuisce la capacità della batteria di accettare altra energia dall'esterno. Il controllo della ricarica è effettuato dal Battery Management System (BMS) in base alla tensione delle singole celle del pacco batteria, della temperatura e del SOC. In generale il BMS ha il compito di monitorare e bilanciare le singole celle del pacco batteria durante i processi di carica e scarica al fine di impedire danneggiamenti, massimizzarne la potenza e l'efficienza e prolungarne la vita utile. In aggiunta ai ruoli di controllo e gestione della batteria, il BMS può svolgere funzioni importanti nell'utilizzo del veicolo elettrico

⁹<https://corporate.enel.it/it/media/press/d/2017/11/e-mobility-revolution-enel-presenta-il-piano-di-infrastrutture-di-ricarica-in-tutta-italia>

¹⁰<https://corporate.enel.it/it/storie/a/2017/05/v2g-l-auto-del-futuro-una-batteria>

¹¹https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:wmpq0FOk_BEJ:https://corporate.enel.it/it/media/press/d/2016/08/nissan-enel-e-nuvve-lanciano-il-primo-hub-v2g-al-mondo-interamente-commerciale-in-danimarca+&cd=3&hl=it&ct=clnk&gl=it

in modalità V2G, quali: calcolo dei costi, calcolo della riduzione della vita utile, calcolo del "drive away time" cioè l'orario in cui il proprietario vuole trovare l'auto pronta con l'autonomia necessaria per il successivo viaggio.

Come illustrato in Figura 9, ai fini della modellazione il processo di carica può essere concretamente suddiviso in due parti. Una prima parte a potenza costante fino al raggiungimento di un prefissato valore del SOC ed una seconda parte in cui si passa alla modalità di carica a tensione costante, con la corrente che decresce fino al completamento della carica.

Per preservare le prestazioni della batteria nel tempo, prove sperimentali effettuate in laboratorio consigliano di non superare l'80-90% della carica massima e di non lasciare scaricare la batteria oltre 20-30% della carica massima.

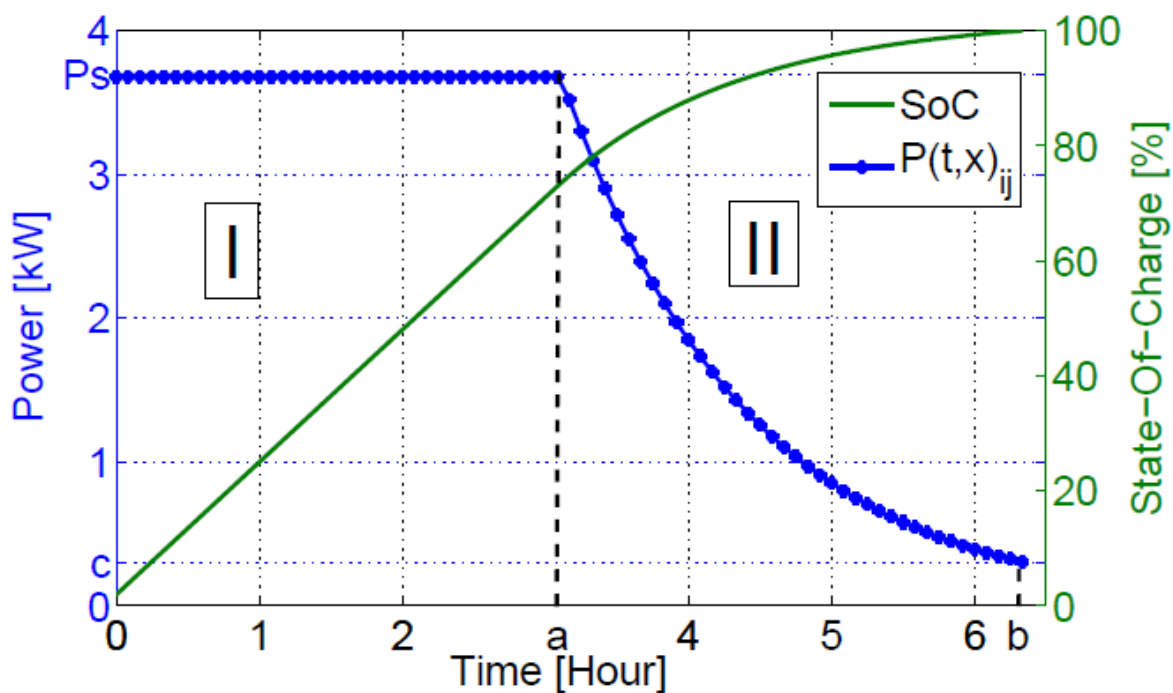


Figura 9: Tipico profilo di ricarica lenta

Un altro importante parametro per la modellazione dell'offerta di ricarica ed il calcolo dei carichi sulla rete elettrica è rappresentato dall'efficienza della ricarica. L'efficienza di ricarica è legata ai rendimenti di conversione del caricabatteria che aumentano nel caso delle ricariche rapide e all'efficienza della batteria che invece risulta essere meno penalizzate nel caso delle ricariche lente.

L'efficienza di ricarica si riduce anche sia all'aumentare del divario tra la potenza nominale della colonnina di ricarica e la potenza massima ammissibile del caricabatteria integrato nel veicolo, che al crescere del divario tra la potenza resa disponibile dal carica batteria integrato nella colonnina o nel veicolo e la potenza effettivamente impegnata per la ricarica batteria.

In Tabella 1 sono riportati i risultati di prove di ricarica su una Nissan Leaf effettuate presso il laboratorio della Casaccia volte a stimare l'efficienza del carica batteria e della batteria per diversi valori di potenza¹².

¹² A. Genovese, F. Ortenzi, C. Villante - On the energy efficiency of quick DC vehicle battery charging - 28th International Electric Vehicle Exhibition, EVS 2015, KINTEXGoyang, South Korea.

Tabella 1: Valori di efficienza per tipologia di ricarica

P[kW]	3	16	22	43	50
Caricabatteria	86.0	91.6	92.2	92.6	92.6
Batteria	97.2	97.1	97.0	91.8	94.2
Totale	83.6	88.5	89.5	85.0	87.0

A titolo di esempio in Figura 10 sono riportati i risultati delle misure¹³ di rendimento della ricarica di una Nissan Leaf effettuate presso l'Idaho National Laboratory dell'Energy Department degli Stati Uniti.

Le misure sono state effettuate utilizzando 2 livelli di tensione (120V e 210 V) a potenza (corrente) variabile di ricarica. I risultati riportati in figura evidenziano sostanziali cali di rendimento della carica al diminuire della corrente assorbita dalla batteria.

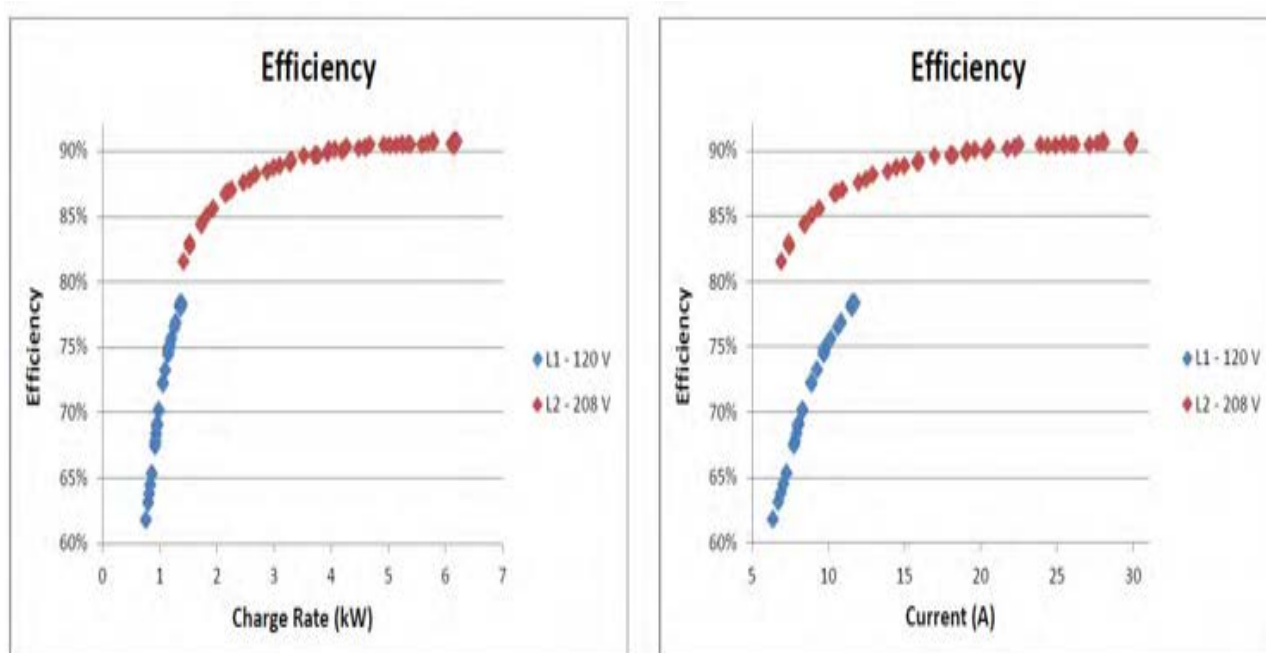


Figura 10: Misure di efficienza di ricarica in base a potenza e corrente assorbita dalla batteria

In Tabella 2 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 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.

¹³ INL - Idaho National Laboratory, "Steady State Vehicle Charging Fact Sheet: 2015 Nissan Leaf", Advanced Vehicles Testing Activity, INL/EXT-15-34055
<https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/fsev/SteadyStateLoadCharacterization2012Leaf.pdf> (accessed the 23th of Jan 2017).

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.

Tabella 2: Tipologie di ricarica e caratteristiche per la simulazione

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	Alternata Monofase	Alternata Monofase	Alternata Trifase	Continua	Continua	Continua
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%

5.3 Modellazione della flotta di veicoli elettrici

Di interesse per la simulazione degli scenari di mobilità elettrica sono tutti veicoli ricaricabili da rete attraverso sistemi a cavo o wireless, sia totalmente elettrici (EV) che di tipo ibrido plug-in (PHEV), con trazione sia elettrica sia a combustione interna.

Alla tipologia PHEV appartengono anche i veicoli con Range Extender, in cui il motore a combustione interna è impiegato solamente come generatore di corrente per ricaricare la batteria di trazione quando il livello di carica è basso.

La ricarica dei PHEV da rete elettrica consente l'impiego di pacchi batteria più performanti rispetto ai veicoli ibridi non plug-in, con autonomie in elettrico più estese (tipicamente fino a 50 chilometri in elettrico). La ricarica dei PHEV avviene esattamente come per le auto elettriche pure, con gli stessi standard di connettori e le stesse modalità di ricarica. Si utilizzano quindi le stesse colonnine di ricarica, sia in ambito privato che in ambito pubblico. Inoltre, anche per le PHEV, il recupero di energia in frenata (freno rigenerativo) contribuisce ad estendere l'autonomia del veicolo in elettrico.

Per la caratterizzazione del parco auto circolante si considerano i segmenti automobilistici¹⁴ stabiliti in Europa per distinguere e catalogare i diversi tipi di automobili. Ogni segmento include una grande quantità di modelli. E' importante notare che più che la potenza, le caratteristiche del motore o gli optional di un dato modello, per far rientrare un'auto in una categoria piuttosto che in un'altra fanno testo le dimensioni, il numero di passeggeri trasportabili, la destinazione d'uso e i volumi.

La classificazione europea si avvale di lettere per identificare i segmenti, che si rifanno principalmente alle dimensioni dei veicoli oppure alla tipologia della carrozzeria.

¹⁴ http://ec.europa.eu/competition/mergers/cases/decisions/m1406_en.pdf

I principali segmenti automobilistici europei sono sei e vanno dalla lettera A alla lettera F. Più in dettaglio e con qualche esempio abbiamo:

- **Segmento A** o "mini cars": auto molto piccole, le classiche CityCar (Smart ForTwo, Renault Twingo, Fiat Panda o la Volkswagen Up);
- **Segmento B** o "small cars": utilitarie a trazione anteriore e carrozzeria due volumi (Ford Fiesta, VW Polo, Opel Corsa, Audi A1);
- **Segmento C** o "medium cars": berline compatte a due o tre volumi (BMW Serie 1, Ford Focus, Opel Astra, VW Golf);
- **Segmento D** o "large cars": berline di medio-grandi dimensioni (Ford Mondeo, Alfa Romeo 159, Mercedes Classe C, BMW Serie 3);
- **Segmento E** o "executive cars": berline di grandi dimensioni e con carrozzeria tre volumi (BMW serie 5, Jaguar XF, Volvo S80, Audi A6);
- **Segmento F** o "luxury cars": lussuose berline di grandi dimensioni (Audi A8, Maserati Quattroporte, Mercedes Classe S, BMW Serie 7, Audi A8).

Accanto a questi sei principali segmenti ne sono stati accostati altri per identificare altre tipologie di veicoli, in particolare: il **Segmento S** per le auto sportive ad alta potenza (Chevrolet Corvette, Bugatti Veyron, Ferrari 458 Italia), il **Segmento J** per i Suv e i fuoristrada (Suzuki Jimmy, VW Touareg, Range Rover), ed infine il **Segmento M** per i minivan o i van (Renault Kangoo, Renault Modus, Citroen C3, Renault Espace).

La Tabella 3 riporta le quote di mercato in Italia per segmento automobilistico per il periodo 2012-2016.

Tabella 3: Mercato italiano per segmento -Quote% ¹⁵

Segmento\Anno	2016	2015	2014	2013	2012
A - mini cars	17,1	17,8	18,4	19,1	19,2
B - small cars	38,1	40,6	41,8	41	37,9
C - medium cars	30,4	28,2	25,8	25,3	26,2
D - large cars	12,2	11,3	11,7	12,3	14,2
E - executive cars	2,0	1,9	2,0	2,1	2,3
F - luxury cars	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2

In figura è riportata la serie storica del numero di autovetture immatricolate. Il tasso di rinnovo annuo del parco è intorno al 4,5%

¹⁵ Fonte UNRAE

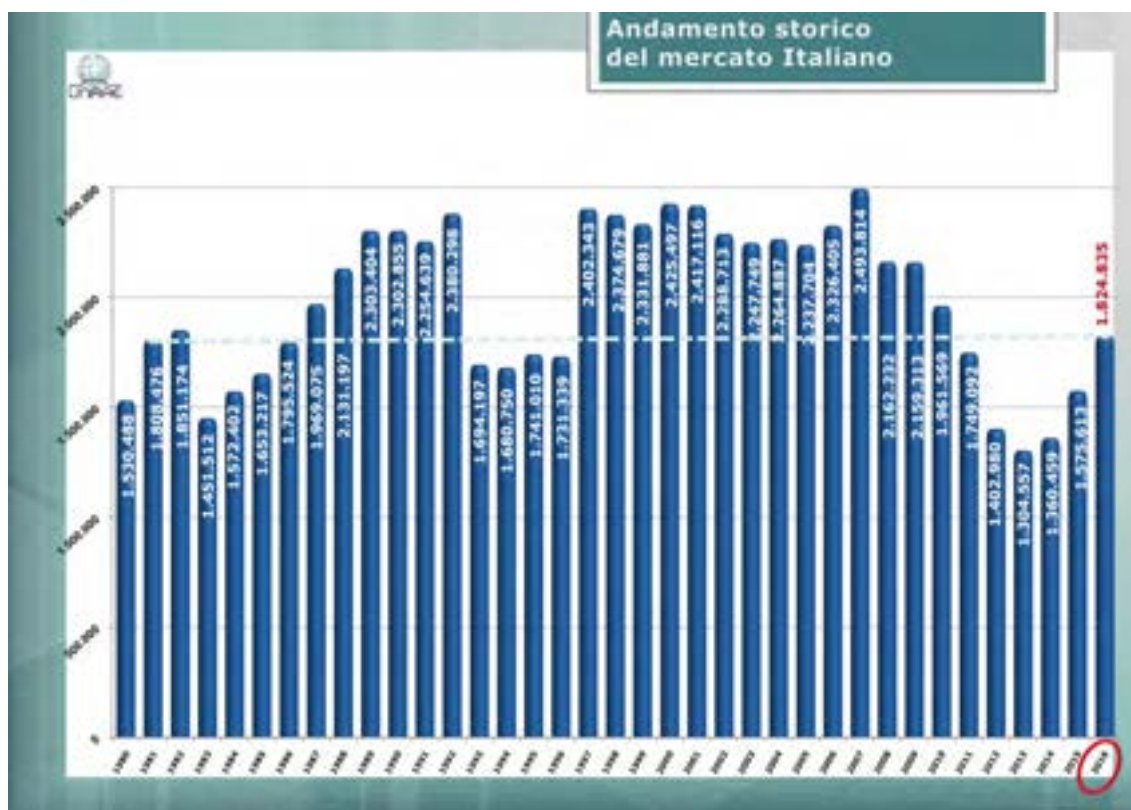


Figura 11: Serie storica delle immatricolazioni in Italia

Infine per la modellazione degli 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).

5.3.1 Il mercato dei veicoli elettrici in Italia

In Italia i veicoli elettrici, in circolazione, costituiscono ancora un mercato di nicchia, il totale delle autovetture e dei veicoli commerciali non raggiunge le 10.000 unità, mentre per quanto riguarda gli autobus, vi sono ancora solo sperimentazioni in poche città italiane.

Il panorama però sta cambiando e si ritiene che ci sarà un forte impulso nei prossimi anni sia per quanto riguarda le autovetture, per le quali si cominciano già a vedere i primi segnali, sia per gli autobus grazie al grosso piano di investimenti (circa 7 ml di euro) del governo per i prossimi 15 anni per il rinnovo del parco autobus; il 25% delle risorse stanziate dovranno essere utilizzate per l'acquisto di autobus a basso impatto ambientale, inoltre il governo sta pensando all'istituzione di criteri premianti per i veicoli a trazione elettrica.

Quasi tutte le case automobilistiche ormai hanno a listino modelli di auto elettriche e l'offerta si incrementa di giorno in giorno, parimenti gli utenti stanno iniziando ad affacciarsi a questo nuovo mercato, rassicurati dalle maggiori autonomie in termini di percorrenza garantite (per alcuni modelli > di 300 km). La mobilità elettrica è perciò in continua rapida crescita come lo dimostrano gli ultimi dati sulle immatricolazioni; nel periodo gennaio- ottobre 2017 sono state vendute 1.645 auto elettriche con un aumento di circa il 50% rispetto alle vendite per lo stesso periodo nell'anno precedente.

Tabella 4: TOP TEN Immatricolazioni auto elettriche gennaio-ottobre 2017

MARCA	MODELLO	gennaio/ottobre 2017	gennaio/ottobre 2016
NISSAN	LEAF	452	373
RENAULT	ZOE	294	112
TESLA	MODEL S	226	187
TESLA	MODEL X	179	15
BMW	I3	110	69
SMART	FORTWO	89	3
CITROEN	C-ZERO	74	137
VOLKSWAGEN	e-UP!	43	49
CITROEN	E-MEHARI	33	8
MERCEDES	B250e	23	82
ALTRE	-	122	64

Fonte: Elaborazioni ENEA su dati UNRAE

In Tabella 5, sono riportate le caratteristiche dei modelli di auto elettrica più venduti nel 2017, si può notare come l'offerta sia decisamente aumentata rispetto ai modelli presenti negli anni passati, distribuendosi su tutti i segmenti di mercato, dalla classica citycar come la SMART alla Model S della Tesla, passando per utilitarie di segmento B e C come la Renault Zoe e la Nissan Leaf.

Tabella 5: caratteristiche dei modelli elettrici più venduti (gennaio - ottobre 2017)

Marca Modello	Massa (kg)	Segmento	Potenza (kW)	Capacità Batteria (kWh)	Ricarica AC slow 3-7 kW	Ricarica AC fast 22-43 kW	Ricarica DC CHADEMO	Ricarica DC CCS COMBO2	Autonomia km	EC (Wh/km)
NISSAN LEAF	1.542	C	80	24 30	X		X		100 – 160 125 - 200	150
RENAULT ZOE	1.502	B	43	22 41	X	X			200 380	146
TESLA MODEL S	2018 2.205	E	123	60 100	X	X	x	X	335 600	210
TESLA MODEL X 75D P100D	2352 2487	D	237 449	75 100	X	X	x	X	417	210
BMW I3	1.270	B	125	33	X			X	190-300	126
SMART FORTWO	1010	A	60	17,6	X	X			160	129
MERCEDES CLASSE B	2170	B	132	28	X	X			200	166
CITROEN C-ZERO	1.120	A	47	14,5	X		X		130	126

Fonte: elaborazioni ENEA su dati EEA, Quattroruote

In Tabella 6 sono riportati anche le prestazioni dei veicoli ibridi plug-in più venduti, sia a benzina che a gasolio, anche se il numero di vendite nel nostro paese è davvero esiguo.

Tabella 6: Caratteristiche dei modelli ibridi plug-in più venduti (gennaio - ottobre 2017)

marca modello	Vendite Gennaio Ottobre (n)	Massa (kg)	Segmento	Capacità Batteria (kWh)	Autonomia elettrico km	FC (litri/100 km)	EC* (Wh/km)	Ricarica AC slow 3-7 kW Tipo2	Ricarica AC fast 22-43 kW	Ricarica DC COMBO
BMW 5xe Active Tourer	293	1660	C	7,6	41	2,0-2,1	119-118	X		
Mercedes GLC350e	226		C	8,7	34		320-110	X		
Mini Countryman PHEV	176	2270	C	7,6	42	2.1		X		
BMW i3 Range Extender	126	1.390	B	18,8	160	4	166	X	X	X
BMW 330e	91	1750	C	11,3	40	1,9		x		
Volkswagen Golf GTE	84	1.599	C			13	276	X		
Audi A3 e-Tron	72	1615	C	8,8	50	1,6		X		
Volvo XC90 PHEV	68	2400	SUV	9,2	43	2,1	181	X		
Porsche Panamera PHEV	58	2,710		9,4 14,1	36 50	2,51	159	X		
Volvo V60 PHEV	46	1.972	D	9,2	50	15	328	X		

Fonte: elaborazioni ENEA su dati EAFO, Costruttori

*: in EC (Wh/km) sono sommati i consumi di carburante e di energia elettrica

In Figura 12 è riportato l'andamento delle immatricolazioni annuali di auto elettriche in Italia dal 2012 al 2016.



Figura 12: Andamento delle immatricolazioni di auto elettriche in Italia

Infine la flotta di autobus elettrici complessiva (privati e pubblici) circolante nel 2015 sul territorio nazionale ammontava a circa 495 unità (fonte ACI) su un parco totale di circa 98.000 autobus dei quali circa 50.000 dedicati al trasporto pubblico locale. Negli ultimi 2 anni c'è stato un considerevole rinnovo del parco autobus grazie agli stanziamenti statali. Alcune aziende hanno acquistato anche autobus elettrici o ibridi, tra questi Torino con 20 autobus elettrici da 12 metri della BYD, Milano 10 autobus 12 metri della Solaris che diverranno 25 nel 2018 e Bergamo con 12 autobus sempre della Solaris.

5.3.2 Parametri e algoritmo di calcolo dei consumi delle auto elettriche

La modellazione delle flotte veicolari elettriche ha lo scopo di integrare i risultati del modulo di generazione dei pattern di uso dei veicoli con il calcolo dello stato di carica (SOC) al termine di ogni singolo viaggio.

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, come già ampiamente documentato nei paragrafi precedenti, il SOC è invece 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 in particolar modo per la quantità di energia impiegata per il riscaldamento e il raffreddamento dell'abitacolo, rispettivamente alle basse e alte temperature.

A titolo di esempio in Figura 13 è riportata la variabilità dei chilometri di autonomia di una flotta di auto Nissan Leaf riscontrata attraverso misure¹⁶ effettuate su strada in Canada nell'arco di un anno. Come già sottolineato, l'ampia variabilità delle prestazioni è legata ai diversi comportamenti degli automobilisti (Stile di guida e uso degli optional di bordo) e alle condizioni di uso del veicolo (tipologia dei percorsi, pendenze delle strade e clima).

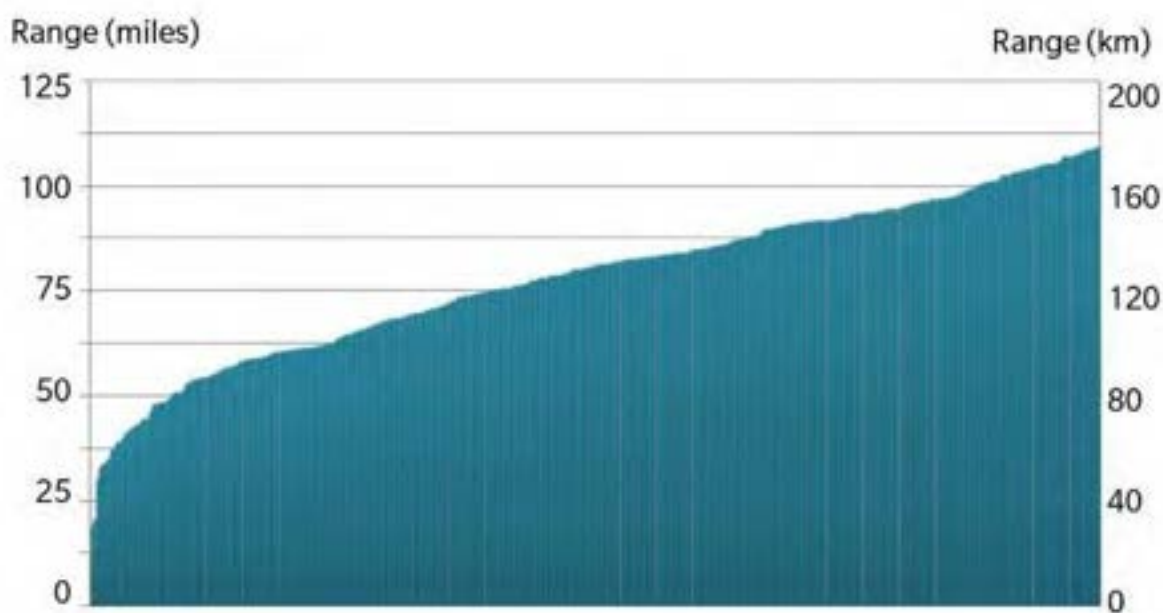


Figura 13: Variabilità dei chilometri di autonomia della Nissan Leaf

¹⁶ <https://www.fleetcarma.com/resources/electric-vehicles-hot-weather-ebook/>

Una recente campagna sperimentale effettuata dall'ENEA per qualificare le prestazioni energetiche del modello Nissan Leaf, appartenente al segmento "C" relativo alle autovetture di medie dimensioni, ha permesso di ricavare la curva (Figura 14) che associa il consumo specifico chilometrico alla velocità media.

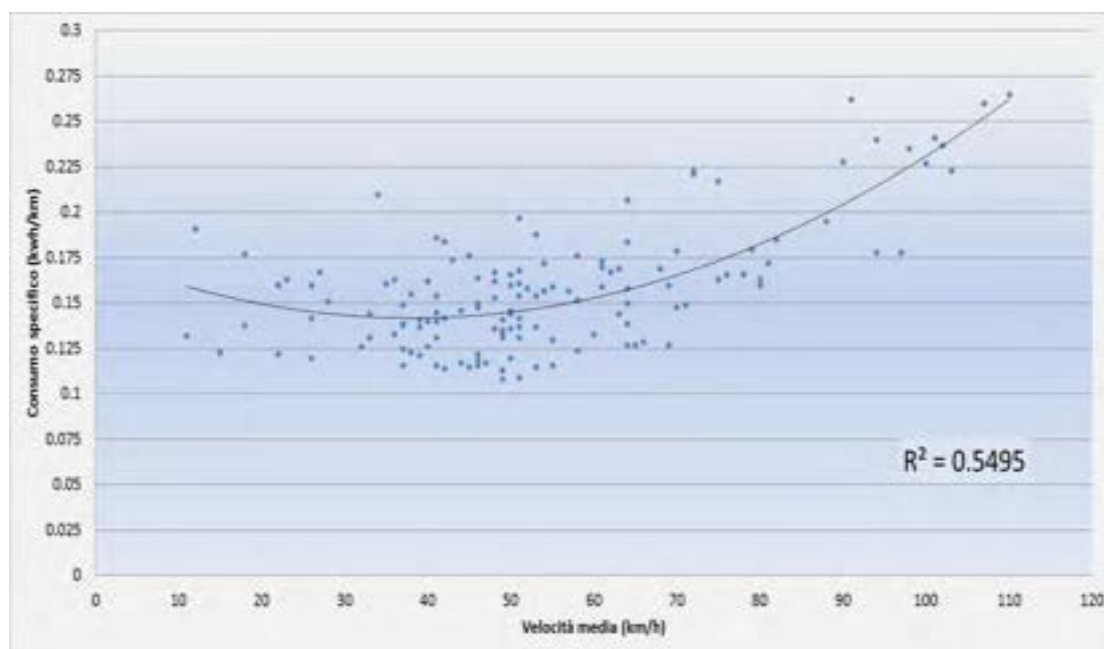


Figura 14: Curva sperimentale del consumo specifico in base alla velocità media

La curva è stata ottenuta integrando i dati delle prove su strada, per una percorrenza complessiva di circa 3600 Km su viabilità sia urbana che extraurbana, con quelli registrati nelle prove su banco a rulli, effettuate riproducendo i cicli di omologazione europei ECE 15-NEDC.

La curva ottenuta ha la seguente espressione:

$$C_c\left(\frac{kWh}{km}\right) = 2 * 10^{-5} * V^2 - 18 * 10^{-4} * V + 0.1759 \quad (1)$$

Il consumo medio ricavato dai dati sperimentali è intorno ai 160 Wh al chilometro, di poco superiore ai consumo dichiarato dalla casa automobilistica.

Il consumo ricavato con la (1) non include le perdite legate al processo di scarica della batteria e al calo di rendimento e prestazioni dei veicoli elettrici in presenza di condizioni meteo particolari.

E' proprio sul tema dell'autonomia dei veicoli elettrici rispetto alla temperatura ambientale che si è concentrata una interessante ricerca¹⁷ del centro studi canadese, Fleetcarma, nell'ambito della quale sono stati pubblicati dei dati statistici sull'autonomia di marcia di due veicoli elettrici (Nissan Leaf e Chevrolet Volt) in funzione della temperatura esterna.

Dal test sono emerse diverse indicazioni, la prima delle quali indica il punto di funzionamento ottimale intorno ai 20 gradi centigradi, con una finestra di buon funzionamento comunque estesa fra i +12 e i +25 °C circa per entrambi i modelli. La seconda che l'autonomia può ridursi anche di più del 30% se la temperatura scende al di sotto dei zero gradi, come ben evidenziato dai grafici riportanti in Figura 15.

Alle temperature estreme, come già evidenziato in precedenza, il consumo extra è prevalentemente correlato all'uso dei dispositivi di riscaldamento o raffreddamento dell'abitacolo. In modo non prevalente il

¹⁷ FleetCarma, 2013, 'Electric Vehicle Range for the Nissan Leaf and Chevrolet Volt in Cold Weather,' <http://www.fleetcarma.com/nissan-leaf-chevrolet-volt-cold-weather-range-loss-electric-vehicle/>

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.

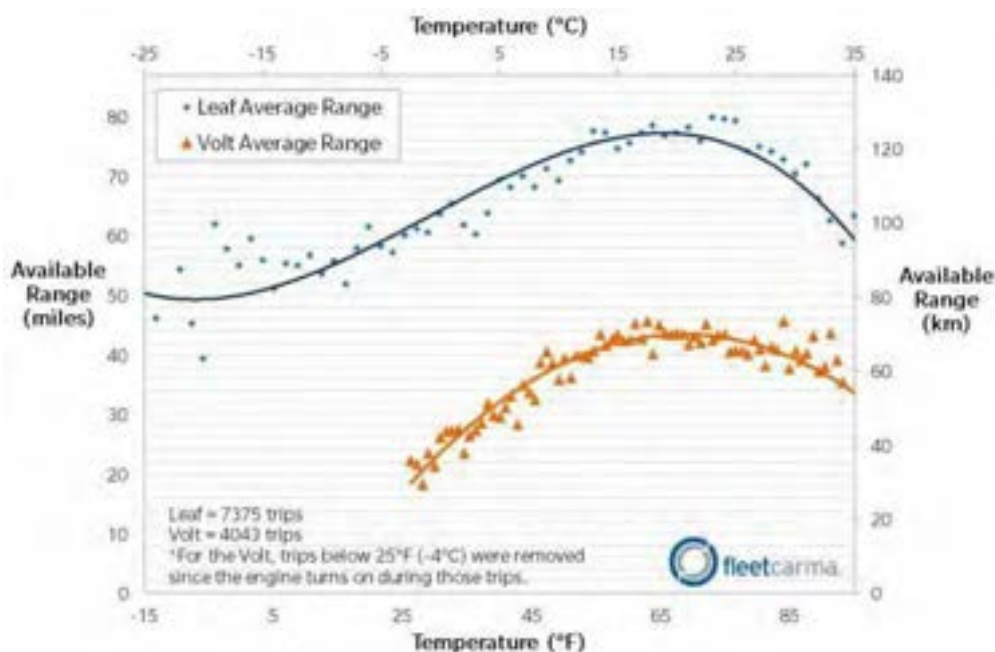


Figura 15: Variazione dell'autonomia in funzione della temperatura

In un altro studio¹⁸, basato sempre sui dati raccolti da FleetCarma riguardanti la Nissan Leaf, è stato valutato l'impatto del clima sull'autonomia e sulle emissioni di CO₂ dei veicoli elettrici negli Stati Uniti. In Figura 16 sono riportati la curva estratta dai dati FleetCarma con i consumi specifici in funzione della temperatura e la mappa dei consumi medi specifici.

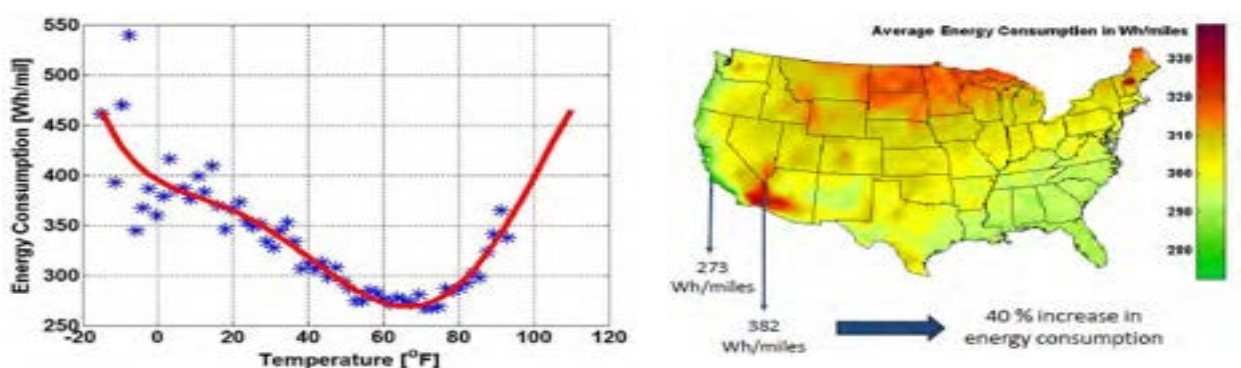


Figura 16: Curva e mappa dei consumi specifici

La curva estratta in questo studio è stata presa a riferimento nel simulatore per calcolare la percentuale di incremento dei consumi in funzione della temperatura.

¹⁸ Yuksel, Tugce; Michalek, Jeremy J. - Effects of Regional Temperature on Electric Vehicle Efficiency, Range, and Emissions in the United States - Environmental Science & Technology,

L'equazione di partenza per la stima del consumo EC, fornita dallo studio, è la seguente:

$$EC(T) = a_0 + \sum_{n=1}^5 a_n T^n \quad \text{dove } [T] = ^\circ F, [EC] = \frac{kWh}{mi} \quad (2)$$

$$\text{con } a_n = \alpha_n \cdot \frac{kWh}{mi \cdot F^n}$$

$$\text{con } \alpha = \{0.3950 \quad -0.0022 \quad 9.1978e^{-5} \quad -3.9249e^{-6} \quad 5.2918e^{-8} \quad -2.0659e^{-10}\}$$

Dall'equazione (2) è stata ricavata l'espressione del consumo chilometrico in funzione della temperatura espressa in gradi Centigradi. In particolare:

$$EC(t) = \frac{1000}{1.60934} \cdot [a_0 + \sum_{n=1}^5 a_n (d + f t)^n] \quad \text{dove } [t] = ^\circ C \text{ e } [EC] = \frac{Wh}{km} \quad (3)$$

$$\text{con } d = 32 ^\circ F, f = 1.8 \frac{^\circ F}{^\circ C}$$

Infine l'espressione con l'incremento percentuale di consumo, calcolato rispetto al consumo minimo della curva (3), risulta come segue:

$$v(t) = \frac{EC(t) - EC_{min}}{EC_{min}} \quad \text{con } EC_{min} = \min_{t \in [-30, 60]} \{EC(t)\} \cong 166.17 Wh \text{ per } t \cong 19.14 ^\circ C \quad (4)$$

$$v(t)\% = v(t) * 100$$

In Figura 17 è riportato l'andamento dell'incremento percentuale in funzione della temperatura

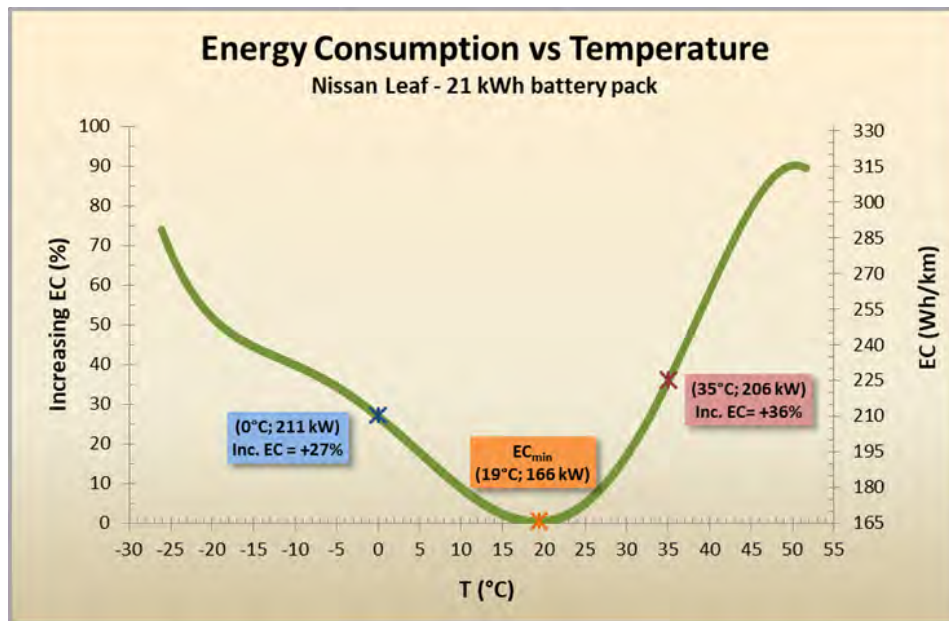


Figura 17: Incremento dei consumi in funzione della temperatura

Ai fini della simulazione, in attesa di misure sperimentali per una gamma più ampia di modelli di veicoli elettrici, la curva d'equazione (1) può essere in prima approssimazione estesa ai diversi segmenti veicolari rapportando il consumo specifico ai consumi medi dei modelli di veicoli presenti nel segmento di mercato. Così facendo, le equazioni rappresentative per i diversi segmenti di mercato risultano le seguenti:

$$C_A = \frac{130}{160} * C_C = 0,812 * C_C$$

$$C_B = \frac{145}{160} * C_C = 0,902 * C_C$$

$$C_D = \frac{180}{160} * C_C = 1,125 * C_C$$

$$C_E = \frac{200}{160} * C_C = 1,225 * C_C$$

Per il calcolo del SOC_E al termine di ogni viaggio si considera la seguente espressione:

$$SOC_E = SOC_S - \frac{C_i * d * (1 + v(t))}{\eta_d * E_i}$$

dove

SOC_S è il SOC della batteria a inizio viaggio

D è la lunghezza del viaggio (km)

η_d è il rendimento in scarica della batteria

$v(t)$ è l'incremento di consumo in funzione della temperatura

T è la temperatura in °C

E_i è la capacità massima della batteria

Nella Tabella 7 sono riportate le specifiche tecniche rappresentative delle diverse tipologie di auto prese in considerazione ai fini della simulazione degli scenari di mobilità elettrica. I valori riportati per ciascun segmento di mercato sono puramente indicativi e quindi modificabili in fase di definizione degli scenari di simulazione.

Tabella 7: Specifiche tecniche per le auto

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

5.3.3 Parametri e algoritmo di calcolo dei consumi per gli autobus elettrici

Per la modellazione degli autobus sono utilizzate le funzioni ottenute dall'Università degli dell'Aquila tramite simulazione di autobus elettrici su cicli reali di marcia.

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

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

La simulazione sui mezzi convenzionali è stata eseguita per convalidare la metodologia, soprattutto dei cicli di guida.

I risultati mostrano un buon accordo tra i dati CORINAIR e quelli calcolati tramite simulazione.

In ognuna delle configurazioni si sono calcolate le curve esponenziali interpolanti al variare della velocità media di percorrenza, così come suggerito dalla procedura CORINAIR, per i veicoli elettrici e i relativi coefficienti sono riportati in Tabella 8.

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

Tabella 8. Coefficienti della funzione relativa ai consumi energetici degli autobus

BUS	Load 0%			Load 50%			Load 100%		
	Slope	α	β	Slope	α	β	Slope	α	β
MINI	-0,06	2,5411	-1,341	-0,06	5,6754	-1,623	-0,06	9,2113	-1,788
	-0,04	2,5411	-1,341	-0,04	5,6754	-1,623	-0,04	9,2113	-1,788
	-0,02	0,1575	0,1335	-0,02	0,2056	0,0901	-0,02	0,2488	0,668
	0	0,3959	0,2623	0	0,3363	0,2216	0	0,4369	0,1837
	0,02	0,507	0,1979	0,02	0,6925	0,1575	0,02	0,9222	0,3455
	0,04	0,8741	0,1383	0,04	1,2313	0,087	0,04	1,7118	0,0241
	0,06	0,8741	0,1383	0,06	1,2313	0,087	0,06	1,7118	0,0241
MIDI	-0,06	6,8107	-1,59	-0,06	11,387	-1,762	-0,06	17,026	-1,896
	-0,04	6,8107	-1,59	-0,04	11,387	-1,762	-0,04	17,026	-1,896
	-0,02	1,0291	-0,493	-0,02	1,3242	-0,545	-0,02	1,5555	-0,569
	0	0,5009	0,01015	0	0,596	0,0935	0	0,694	0,086
	0,02	0,8485	0,1232	0,02	1,0415	0,1085	0,02	1,2559	0,0912
	0,04	1,3801	0,0943	0,04	1,7228	0,0742	0,04	2,1347	0,0466
	0,06	1,3801	0,0943	0,06	1,7228	0,0742	0,06	2,1347	0,0466
STANDARD	-0,06	17,176	-1,93	-0,06	28,790	-2,314	-0,06	41,023	-2,414
	-0,04	17,176	-1,93	-0,04	28,790	-2,314	-0,04	41,023	-2,414
	-0,02	4,1733	-1,001	-0,02	5,9565	-1,877	-0,02	7,1187	-1,941
	0	0,7237	0,033	0	0,8793	-0,014	0	1,0533	-0,022
	0,02	1,1791	0,0879	0,02	1,5419	0,0347	0,02	1,9926	-0,006
	0,04	1,9146	0,06559	0,04	2,6068	-0,006	0,04	3,5283	-0,072
	0,06	1,9146	0,06559	0,06	2,6068	-0,006	0,06	3,5283	-0,072
ARTICULATED	-0,06	31,346	-2,173	-0,06	47,386	-2,314	-0,06	63,019	-2,414
	-0,04	31,346	-2,173	-0,04	47,386	-2,314	-0,04	63,019	-2,414
	-0,02	26,582	-1,729	-0,02	43,077	-1,877	-0,02	54,711	-1,941
	0	0,9473	-0,024	0	1,1356	-0,014	0	1,3744	-0,022
	0,02	1,5083	0,0613	0,02	2,0333	0,0347	0,02	2,7097	-0,006
	0,04	2,4731	0,042	0,04	3,523	-0,006	0,04	4,9804	-0,072
	0,06	2,4731	0,042	0,06	3,523	-0,006	0,06	4,9804	-0,072

Per il calcolo del SOC_E al termine di ogni viaggio si considera, analogamente al caso delle auto vetture, la seguente espressione:

$$SOC_E = SOC_S - \frac{C_i * d * (1 + v(t))}{\eta_d * E_i}$$

dove

SOC_S è il SOC della batteria a inizio viaggio

d è la lunghezza del viaggio (km)

η_d è il rendimento in scarica della batteria

$v(t)$ è incremento di consumo in funzione della temperatura

t è la temperatura in °C

E_i è la capacità massima della batteria

Nel calcolo del SOC per ciascuna tipologia di autobus si possono assumere come valori di riferimento per la capacità della batteria quelli compatibili con lo schema di ricarica al capolinea durante la sosta. In particolare: 40kWh per i Mini, 50kWh per i Midi, 60kWh per gli Standard ed infine 90 kWh per gli Articolati

5.4 Modellazione dei profili di carico di utilizzazione dell'energia elettrica

Il simulatore è ideato per la rappresentazione di scenari urbani di mobilità elettrica e l'analisi delle possibili ripercussioni sui carichi elettrici a scala locale/urbana.

La simulazione è, in particolare, intesa come uno strumento per valutare eventuali sovraccarichi locali dovuti ai concomitanti carichi elettrici delle altre utenze domestiche e non domestiche presenti sul territorio urbano e quantificare il potenziale apporto energetico fornito localmente dai pannelli fotovoltaici. La simulazione fornisce come risultato l'andamento dei carichi giornalieri, settimanali e mensili con passo temporale di 15 minuti a diversi livelli di aggregazione geografica: dal singolo elemento della griglia con cui è stata suddivisa l'area di studio, alla singola zona o quartiere all'interno della città, all'intero territorio urbano o metropolitano.

L'approccio proposto per la stima dei profili di carico delle utenze domestiche e terziarie prende in considerazione le informazioni statistiche disponibili su popolazione, abitazioni, addetti e servizi presenti nelle zone censuarie così come definite dall'Istat. Oltre ai dati censuari, l'approccio utilizza come dati di input le curve tipiche di carico giornaliere associate alle diverse categorie di utenza presenti localmente.

Il carico identifica il fabbisogno di energia elettrica da parte di un'utenza. Generalmente ci si riferisce all'energia nell'unità di tempo, cioè alla potenza e, fondamentalmente, alla potenza attiva (kW) responsabile dell'effettiva energia trasferita all'utilizzatore.

L'andamento di queste curve è soggetto a variazioni in base alla localizzazione geografica, alla stagione dell'anno e al giorno della settimana.

Le curve tipiche di carico giornaliere sono solitamente ricavate attraverso campagne di rilevamento dei consumi elettrici installando presso le singole utenze del campione appositi dispositivi di misura che rilevavano i consumi con frequenza prestabilita.

Nei prossimi anni la sempre maggiore disponibilità di nuovi contatori elettronici presso le utenze permetterà di accedere in modo dettagliato alle informazioni di consumo dell'utente e, conseguentemente, di effettuare più agevolmente e con maggiore continuità la rilevazione della curva di carico.

A titolo di esempio in Figura 18 sono riportate gli andamenti dei carichi elettrici medi, invernali ed estivi, rilevati da un campione di utenze domestiche (Fonte CESI – Ricerca di Sistema).

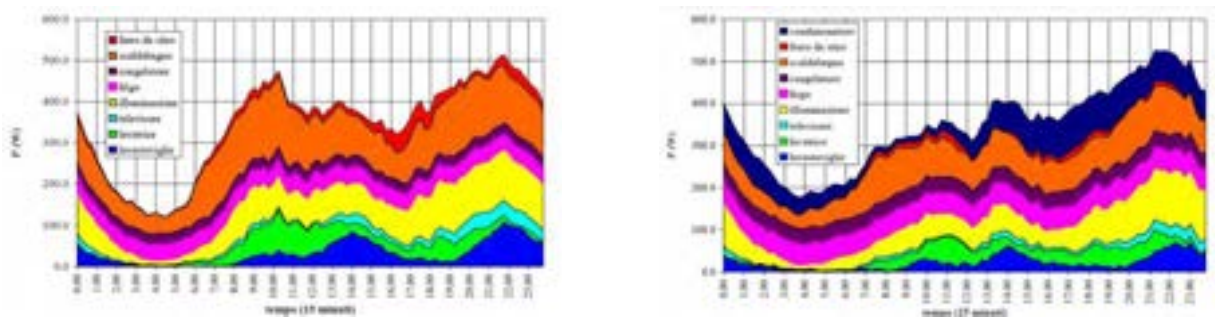
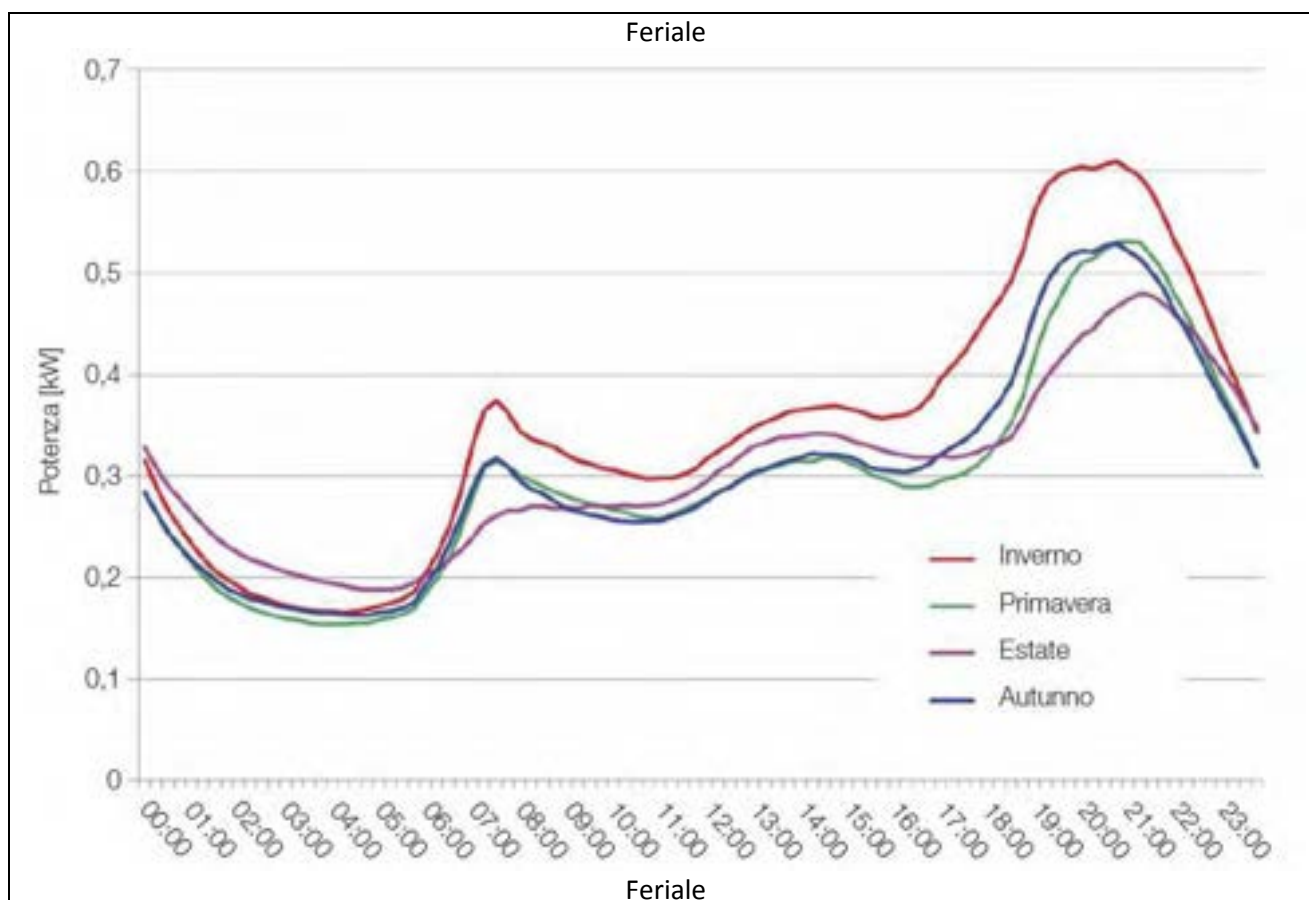


Figura 18: Curve di carico invernale ed estivo per utenza domestica

Nei grafici è presente una distinzione tra i sistemi di illuminazione e i principali elettrodomestici, incluso l'impianto di climatizzazione estiva, il quale rappresenta un carico di una certa importanza e con caratteristiche differenti dal resto. L'area sottesa dalle curve di carico rappresenta l'energia totale assorbita nel periodo in esame, mentre l'ordinata massima indica la massima potenza attiva assorbita dal carico.

Per quanto riguarda il settore terziario i profili di carico sono fortemente influenzati dagli orari di inizio e fine attività, nonché dai periodi di pausa in cui il personale o parte di esso abbandona la postazione di lavoro.

Sempre a titolo di esempio nella Figura 19 vengono presentate le curve aggregate di carico quortorarie ottenute in uno studio condotto da GfK Eurisko su un campione di 1.200 famiglie, statisticamente significativo per numerosità e stratificazione. Le curve aggregate di carico ottenute 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 (estate, autunno, inverno e primavera).



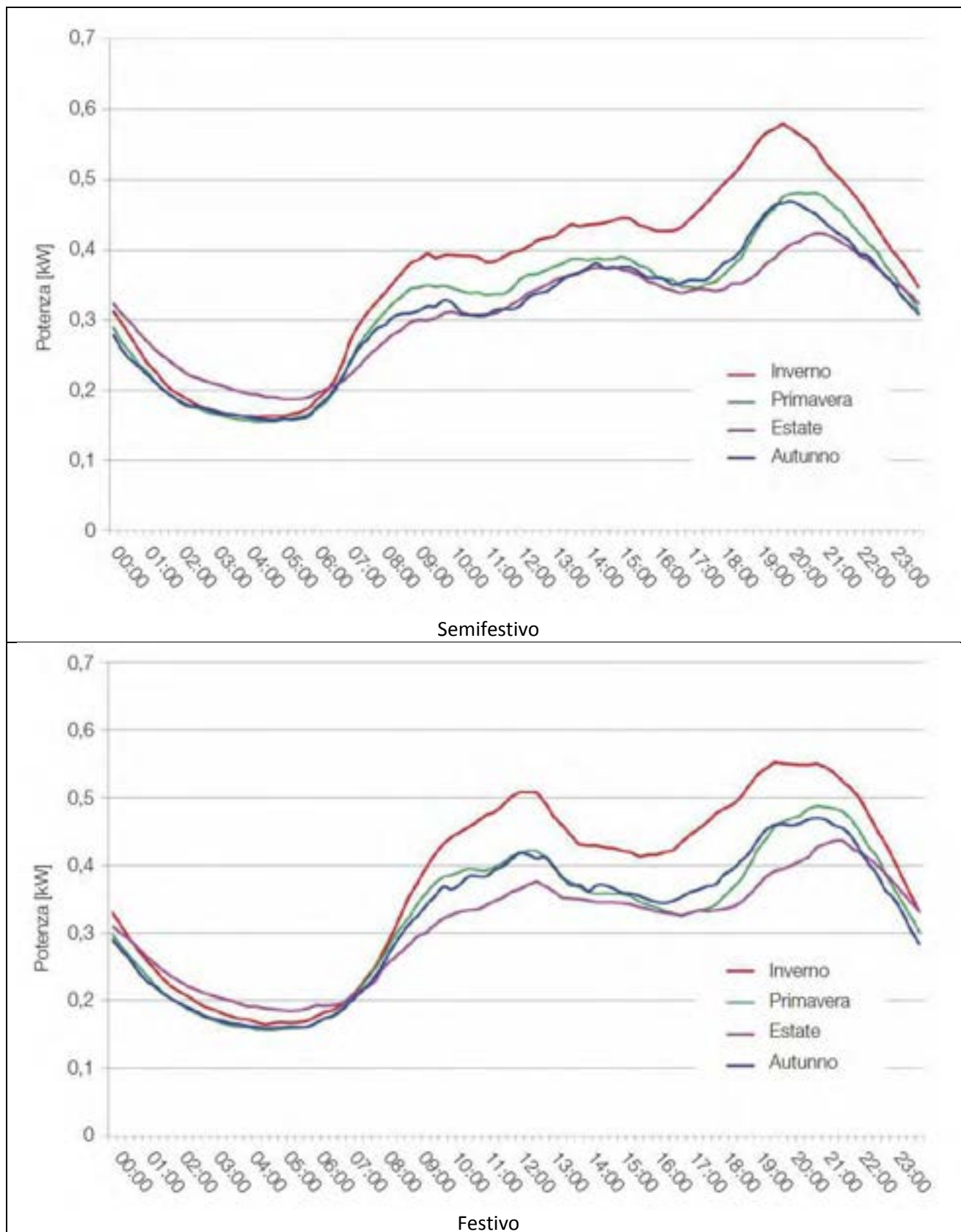


Figura 19: Curve di carico aggregate quartiorarie

Come si può osservare nei giorni feriali si distingue un picco intorno alle 8:00 del mattino ed un picco serale più esteso intorno alle 21:00. Nei giorni di sabato e domenica il picco del mattino è intorno alle ore 9:00 e

alle ore 12 rispettivamente, mentre il picco serale è intorno alle 20:00 per entrambi. Durante il periodo estivo il picco serale è meno esteso ma più spostato verso le ore notturne a causa dell'aumento delle ore di luce durante il pomeriggio.

In tabella sono riportati i consumi giornalieri medi per giorno tipo e per stagione dell'anno.

TIPOLOGIA GIORNO	CONSUMO GIORNALIERO MEDIO			
	INVERNO [kWh]	PRIMAVERA [kWh]	ESTATE [kWh]	AUTUNNO [kWh]
Feriale	8,38	7,16	7,35	7,29
Sabato	8,79	7,69	7,43	7,44
Festivo	8,97	7,72	7,41	7,68

Tabella 9: Consumo giornaliero medio per giorno tipo e stagione dell'anno ¹⁹

Nel simulatore saranno utilizzati diagrammi medi giornalieri di carico elettrico per utenza domestica e non domestica riportati in letteratura, in particolare quelli che possono essere rapportati ai valori numerici delle variabili censuarie considerate dall'ISTAT per descrivere la popolazione, le abitazioni e i servizi presenti sul territorio in studio

5.5 Conclusioni e futuri sviluppi

Nel corso del primo anno sono state definite le specifiche funzionali dell'ambiente di simulazione e individuate le soluzioni implementative per conseguire gli obiettivi funzionali attesi e realizzare le modalità ottimali di interazione con l'esterno.

Le attività del primo anno sono state finalizzate alla definizione del framework metodologico e modellistico che costituisce l'asse portante delle funzionalità principali dell'ambiente di simulazione.

Sono state in particolare studiate e definite le proprietà teoriche dei modelli utilizzati per riprodurre i pattern 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)**, 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 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)** 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 determinati da misure infrastrutturali e gestionali volte a

¹⁹ M.Gallanti, W.GRATTIERI, S.Maggiore, A.Marino, Analisi ed evoluzione negli anni delle curve di carico dei clienti domestici, in L'Energia Elettrica, num 6vol 89

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)** 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, dalla condizioni di marcia, dalla pendenza media (solo per gli autobus) e dalla temperatura esterna.
- **Charging Behaviour Module (CBM)** 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.
- **Charging Stations Module (CSM)** 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;
- **Photovoltaic Energy Production Module (PEPM)** per ottenere la mappatura locale, a determinate scale temporali, della radiazione solare mediante appropriati modelli di comportamento dell'atmosfera e caratterizzare i flussi energetici di soluzioni impiantistiche di ricarica con pannelli fotovoltaici; il modulo consente 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.
- **Domestic/Tertiary Energy Module (DEM)** per la stima dell'evoluzione spaziale e temporale della domanda di energia elettrica per il settore residenziale. L'approccio proposto prende in considerazione le informazioni statistiche disponibili su popolazione, abitazioni, addetti e servizi presenti nelle zone censuarie così come definite dall'Istat. Oltre ai dati censuari, l'approccio utilizza come dati di input le curve tipiche di carico giornaliero associate alle diverse categorie di utenza presenti localmente.

Nel corso del secondo anno sono previsti l'ingegnerizzazione del simulatore e la sperimentazione nell'area metropolitana di Roma.

L'ambiente software di simulazione interattiva rappresenterà, da un lato, la sintesi dei modelli sviluppati nel corso del primo anno, che saranno opportunamente integrati, adattati e ottimizzati al fine di realizzare la loro completa integrazione funzionale.

Dall'altro lato, l'ambiente software offrirà 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 del flusso elettrico. Le quantità visualizzate saranno il risultato delle simulazioni ottenute dai modelli.

Il sistema software offrirà anche la possibilità di interagire dinamicamente con la simulazione, offrendo un'interfaccia semplice ed intuitiva attraverso la quale creare e modificare le ipotesi di dislocazione delle stazioni di ricarica. Sarà inoltre possibile modificare, per le varie stazioni, la modalità di ricarica.

L'esito di queste azioni sarà dunque elaborato in tempo reale dal motore di simulazione. Lo stato aggiornato del sistema sarà quindi visualizzato, offrendo nuove possibilità di interazione per l'elaborazione di nuovi scenari.

Alla fase di ingegnerizzazione seguirà l'attività di verifica e test per individuare eventuali malfunzionamenti e di risolverli prima del rilascio finale del software. L'attività di test, in particolare, sarà articolata nelle due sotto-attività di test dei singoli moduli e del sistema integrato. Questa attività è volta ad assicurare che il software realizzato soddisfi i requisiti stabiliti, valutandone la correttezza funzionale rispetto alle specifiche. Il sistema software, validato e testato assumendo come caso di studio l'area metropolitana di Roma, permetterà di analizzare le variazioni spaziali e temporali 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.