



Ricerca di Sistema elettrico

Simulatore di scenari urbani di mobilità veicolare elettrica: calibrazione, validazione e applicazione del modello di caratterizzazione della sosta nei parcheggi di interscambio

Marialisa Nigro, Marina Ferrara

SIMULATORE DI SCENARI URBANI DI MOBILITÀ VEICOLARE ELETTRICA: CALIBRAZIONE, VALIDAZIONE E APPLICAZIONE DEL MODELLO DI CARATTERIZZAZIONE DELLA SOSTA NEI PARCHEGGI DI INTERSCAMBIO

Marialisa Nigro, Marina Ferrara (Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre)

Novembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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

Progetto: D.7 Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: a. Scenari mobilità elettrica

Responsabile del Progetto: Maria Pia Valentini - ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Modellizzazione per la caratterizzazione della domanda di sosta nelle stazioni di interscambio e l'analisi di politiche di incentivazione della ricarica"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Gaetano Valenti

Responsabile scientifico Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre: prof. Marialisa Nigro

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	6
2.1 MODELLO MULTIMODALE: SPECIFICAZIONE, CALIBRAZIONE E VALIDAZIONE	6
2.1.1 <i>Test e sensitività</i>	18
2.2 INCENTIVI ECONOMICI PER LA MULTIMODALITÀ E SCHEMI VEHICLE TO GRID.....	20
2.2.1 <i>Scambio sul posto: riferimenti normativi e computo del costo unitario</i>	22
2.2.2 <i>Computo dell'incentivo economico per Vehicle To Grid presso i parcheggi di scambio</i>	23
2.3 SIMULAZIONE DI SCENARI PER LA RIDUZIONE DELLA CONGESTIONE, IL CONTENIMENTO DEI PICCHI E LA RIDISTRIBUZIONE DELLA DOMANDA DI ENERGIA.....	25
2.3.1 <i>Integrazione del modello multi modale nel simulatore</i>	29
3 CONCLUSIONI.....	32
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	34
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	35
6 APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	36

Sommario

Il presente documento riporta la descrizione delle attività condotte dal Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre, nel secondo anno (accordo PAR 2017) del progetto D.7 Mobilità elettrica sostenibile ed i relativi risultati ottenuti in termini di ricerca e trasferimento tecnologico.

Tale annualità ha in particolare visto:

1. la specificazione finale, la validazione ed il test di un modello atto a rappresentare comportamenti di scelta multimodali da parte dei veicoli elettrici; tali comportamenti si traducono nello scambio tra modalità privata e rete del trasporto collettivo presso i parcheggi di Park & Ride (P&R), con riferimento ad un caso applicativo di elevate dimensioni ed elevata complessità (Roma);
2. l'introduzione nel modello suddetto di incentivi atti a favorire l'uso delle postazioni di ricarica presso i parcheggi di P&R da parte dei veicoli elettrici ed una stima economica dell'importo di tali incentivi nello specifico caso di studio;
3. l'integrazione del suddetto modello all'interno di un simulatore in grado di rappresentare i *pattern* di mobilità sulla rete ed i comportamenti di ricarica, nonché la successiva simulazione di politiche trasportistiche volte alla multi modalità per la riduzione delle condizioni di congestione da traffico veicolare, la redistribuzione della domanda di energia, il contenimento dei picchi e la stabilizzazione della rete.

Il documento segue la struttura delle tre attività precedentemente riportate.

Nel paragrafo 2.1 sarà evidenziata la formulazione del modello multimodale e le migliorie ad esso apportate rispetto alla prima annualità del progetto, in termini di variabili esplicative e dati aggiuntivi. Seguono le attività di test per la determinazione dei parametri ottimali della specifica tecnica di Machine Learning (Random Forest) utilizzata nella fase di apprendimento del modello. In ultimo è riportata l'analisi di sensitività del modello alle principali variabili esplicative (in particolare al livello di riempimento dei parcheggi di scambio ed all'accessibilità garantita dal sistema di trasporto).

Nel paragrafo 2.2 si illustra la metodologia proposta per l'introduzione degli incentivi atti a favorire l'uso delle postazioni di ricarica presso i parcheggi di scambio da parte dei veicoli elettrici. Quindi si va a quantificare, attraverso una metodologia mutuata dal sistema di "scambio sul posto" relativa ai pannelli fotovoltaici (Articolo 6, DL 387/03, [4]), quale potrebbe essere l'incentivo economico di riferimento nel caso romano per l'applicazione di un sistema di tipo *Vehicle To Grid* presso i parcheggi di P&R.

Nel paragrafo 2.3 si illustrano gli scenari simulati attraverso l'adozione del modello multimodale, che vedono l'implementazione di politiche trasportistiche sia di tipo *pull* (miglioramento del sistema di trasporto collettivo a livello di rete) che di tipo *push* (limitazione degli ingressi dei veicoli in specifiche aree sensibili della città) per la riduzione della congestione da traffico veicolare e la redistribuzione della domanda di energia. Infine si riporta la struttura di integrazione del modello multimodale con il modello ad agenti sviluppato dal Dipartimento di Fisica (DF) dell'Università di Roma "La Sapienza" all'interno di un simulatore per la mobilità elettrica e si analizzano i risultati delle suddette politiche.

1 Introduzione

La ricerca si inquadra in uno scenario di mobilità che vede un elevato tasso di penetrazione dei veicoli elettrici nei contesti urbani: ciò, se da una parte è indice di riduzione delle emissioni inquinanti, dall'altra non è indice di riduzione del numero di vetture circolanti. Ne consegue che le problematiche di congestione non vengono ad essere risolte e a tali problematiche si possono affiancare criticità della rete di distribuzione di energia, a seguito di fenomeni di picco della domanda in specifiche aree della città o in specifiche fasce orarie. In tale ottica, gli enti locali dovranno auspicabilmente intervenire con opportune politiche trasportistiche quali *congestion pricing*, limitazioni degli ingressi in aree "sensibili" della città, contestuale miglioramento del sistema di trasporto collettivo e interventi di incentivazione alla sosta nei parcheggi di scambio, il tutto al fine di limitare il superamento delle condizioni di sovrasaturazione della rete e ridistribuire la domanda di energia. Uno strumento in grado di simulare le conseguenze di tali politiche e tali scenari risulta dunque necessario e questo è proprio il fine ultimo della ricerca nel suo complesso che vede la realizzazione di un simulatore della mobilità elettrica.

In tale contesto, il gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli studi Roma Tre, ha l'obiettivo di sviluppare, testare ed applicare un modello multimodale in grado di valutare l'eventuale incremento della quota di utenti che effettua l'interscambio tra modalità di trasporto privata elettrica e modalità di trasporto pubblico a valle dell'introduzione di opportune politiche trasportistiche e di incentivazione economica.

Per questo, a partire dalla prima annualità del progetto, si sono avviate le attività di calibrazione e validazione di un modello in grado di calcolare le variazioni di domanda presso i parcheggi di scambio (Park & Ride, P&R) al variare del livello di servizio fornito dall'offerta di trasporto, dell'interazione tra domanda di spostamento ed offerta stessa, delle caratteristiche territoriali ed insediative dell'area di studio, con riferimento ad un caso applicativo di elevate dimensioni ed elevata complessità (Roma). Tale modello si configura come un modello di natura aggregata: l'output è la quota di domanda di P&R emessa da ciascuna zona dell'area di studio per ogni intervallo temporale nell'arco di una giornata feriale media.

Rispetto alla prima versione del modello, così come derivata per l'annualità 2016 (PAR2016), nella seconda annualità è stata calibrata e validata una seconda struttura, alimentando il processo attraverso fonti di dati aggiuntive, quali dati da assegnazione su modello di rete e dati da matrici di domanda trasportistiche. Il modello è stato quindi oggetto di numerosi test per valutare la combinazione ottimale dei parametri che regolano il processo di apprendimento della tecnica di Machine Learning (Random Forest) utilizzata, mentre ulteriori test sono stati condotti per valutarne la sensibilità del modello alle variabili indipendenti. Al modello calibrato e validato è stata affiancata e proposta una metodologia per l'introduzione di incentivi atti a favorire l'uso delle postazioni di ricarica presso i parcheggi di scambio da parte dei veicoli elettrici, andando dunque ad incrementare l'attrattività dei parcheggi stessi e dello scambio verso il sistema di trasporto collettivo. Tali incentivi possono derivare da eventuali sconti sul costo dell'abbonamento al sistema di trasporto collettivo, così come ad eventuali sconti sulla bolletta elettrica. In quest'ultimo caso si ipotizza che i veicoli elettrici fermi nei parcheggi possano cedere parte della loro energia alla rete (schemi di *Vehicle To Grid*). Ciò deve ovviamente configurarsi in un pagamento di tale energia ceduta, o alternativamente in uno sconto sulla bolletta elettrica, cosa che si è andati a quantificare in questo studio secondo un approccio mutuato dal sistema di "scambio sul posto" comunemente utilizzato nel caso dei pannelli fotovoltaici (Articolo 6, DL 387/03, [4]).

Il modello multimodale è stato infine integrato con il modello ad agenti sviluppato dal Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "La Sapienza" all'interno del simulatore di mobilità elettrica in grado di rappresentare su mappa i risultati a valle della definizione di opportuni scenari di politiche trasportistiche per la riduzione delle condizioni di congestione da traffico veicolare, la ridistribuzione della domanda di energia, il contenimento dei picchi e la stabilizzazione della rete.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Modello multimodale: specificazione, calibrazione e validazione

Il modello multimodale sviluppato calcola la quota di domanda di Park & Ride emessa da ciascuna zona dell'area di studio per ogni intervallo temporale nell'arco della giornata ferial media. La sua struttura funzionale è:

$$(G_o^{\text{Park}} / G_o) |_{Dt} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + I(\text{Beneficio } \text{€}) \quad \text{per ogni Dt} \quad (1)$$

con

G_o^{Park} / G_o : la quota di spostamenti emessi dalla zona di origine e che effettua Park & Ride nell'intervallo di tempo Dt;

x_1, x_2, \dots, x_n : le variabili esplicative del fenomeno (variabili indipendenti), possono o meno essere riferite all'intervallo temporale Dt a seconda che esista o meno una variabilità temporale della singola x ;

f : funzione calibrata utilizzando un processo di apprendimento supervisionato denominato Random Forest, RF [1];

I : funzione che lega l'aumento della quota di domanda di Park & Ride di veicoli elettrici a benefici economici a cui gli stessi possono essere soggetti tramite politiche di incentivazione alla sosta presso i parcheggi di scambio nel medio/lungo periodo [1].

La calibrazione della funzione f necessita in primo luogo della definizione delle variabili indipendenti x .

Come riportato nel rapporto tecnico dell'annualità 2016, tra le variabili indipendenti ci si aspetta di trovare informazioni circa l'accessibilità ai parcheggi di scambio e le caratteristiche dell'offerta di trasporto, così come variabili in grado di descrivere eventuali politiche di tariffazione in destinazione o incentivi per i veicoli elettrici.

In particolare, nella prima fase di definizione del modello, le variabili indipendenti x sono state distinte in funzione di:

1. dipendenza sia dall'origine dello spostamento che dall'intervallo temporale;
2. dipendenza solo dall'origine dello spostamento e non dall'intervallo temporale;
3. dipendenza solo dall'intervallo temporale e non dall'origine.

Di seguito si riassumono le specifiche per il calcolo di ogni variabile [6]:

Variabili indipendenti funzione sia dell'origine che dell'intervallo temporale:

$$x_1 = (\sum_{P \in O} t_{OP} f_{OP}) / (\sum_{P \in O} f_{OP}) = (\sum_{P \in O} t_{OP} f_{OP}) / G_o^{\text{FCD}|\text{Park}} \quad \text{per ogni } o, \text{ per ogni Dt} \quad (2)$$

Con:

t_{OP} = tempo medio di percorrenza origine-parcheggio tramite mezzo privato nell'intervallo Dt considerato, come desunto da dato FCD;

f_{OP} = flusso FCD origine-parcheggio nell'intervallo Dt considerato;

$G_o^{\text{FCD}|\text{Park}}$ = numero di spostamenti FCD emessi dall'origine e che effettuano Park & Ride nell'intervallo Dt considerato

$$x_2 = (\sum_{P \in O} t_{P \rightarrow *}^{TP} f_{OP}) / (\sum_{P \in O} f_{OP}) = (\sum_{P \in O} t_{P \rightarrow *}^{TP} f_{OP}) / G_o^{\text{FCD}|\text{Park}} \quad \text{per ogni } o, \text{ per ogni Dt} \quad (3)$$

Con:

$t_{p \rightarrow *}^{TP}$ = tempo medio di raggiungimento di tutte le destinazioni dell'area di studio tramite trasporto pubblico a partire dal parcheggio p nell'intervallo di tempo Dt;

Viene definita una variabile analoga a x2, denominata x2_bis, che a differenza della precedente inserisce, al posto del tempo medio di raggiungimento di tutte le destinazioni, il numero medio di cambi di mezzi di trasporto collettivo ($m_{p \rightarrow *}^{TP}$) a partire dal parcheggio p nell'intervallo di tempo Dt: $x2_bis = (\sum_{p \in O} m_{p \rightarrow *}^{TP} f_{OP}) / (\sum_{p \in O} f_{OP}) = (\sum_{p \in O} t_{p \rightarrow *}^{TP} f_{OP}) / G_o^{FCD|Park}$ per ogni o, per ogni Dt

$$x3 = (\sum_D f_{OD} ((\sum_{p \in O} t_{pD}) / n_{p \in O})) / G_o^{FCD} \text{ per ogni o, per ogni Dt} \quad (4)$$

con:

f_{OD} = flusso FCD origine-destinazione nell'intervallo Dt considerato;

t_{pD} = tempo di viaggio tramite sistema di trasporto collettivo parcheggio-destinazione nell'intervallo Dt considerato

n_p = numero di parcheggi appartenenti all'origine o

G_o^{FCD} = numero di spostamenti FCD emessi dall'origine nell'intervallo Dt considerato

Viene definita una variabile analoga a x3, denominata x3_bis che a differenza della precedente inserisce al posto del tempo parcheggio-destinazione, il numero medio di cambi di mezzi di trasporto collettivo (m_{pD}) da p a d nell'intervallo di tempo Dt: $x3_bis = (\sum_D f_{OD} ((\sum_{p \in O} m_{pD}) / n_{p \in O})) / G_o^{FCD}$ per ogni o, per ogni Dt

$$x4 = \sum_D (t_{OD} - (\sum_{p \in O} (t_{OP} + t_{pD}) / n_{p \in O})) \text{ per ogni o, per ogni Dt} \quad (5)$$

con:

t_{OD} = tempo di viaggio origine-destinazione da FCD nell'intervallo Dt considerato

$$x5 = (\sum_{p \in O} r_p) / n_{p \in O} \text{ per ogni o, per ogni Dt} \quad (6)$$

con

r_p = riempimento del parcheggio p nell'intervallo temporale Dt

Variabili indipendenti funzione solamente dell'origine e non dell'intervallo temporale

La variabile x6 rappresenta l'estensione geografica della zona di origine espressa in km² (Figura 1).



Figura 1. Estensione delle zone (x6).

La variabile x7 rappresenta la densità abitativa delle zone di origine in esame. Al numeratore del rapporto Popolazione/Area sono compresi solo gli utenti con età tra i 19 e i 70 anni, poiché potenziali utenti della modalità Park & Ride (patentati e occupati).

La distribuzione dei valori di x7 sul territorio provinciale è visibile nella seguente figura:

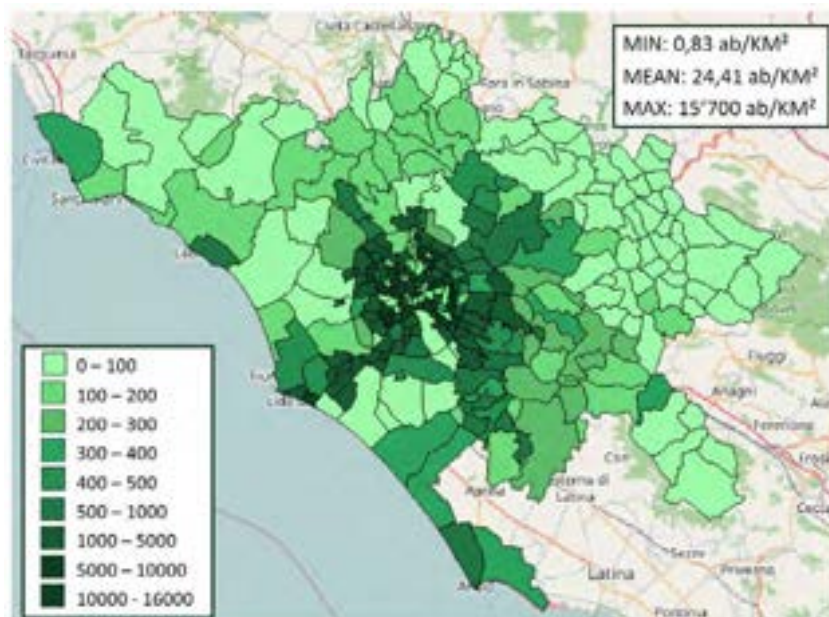


Figura 2. Densità abitativa (x7).

La variabile x8 (Figura 3) è una variabile binaria che vale 1 se l'origine è compresa all'interno del Grande Raccordo Anulare, 0 altrimenti.



Figura 3. Localizzazione delle zone (x8).

La variabile x9 (Figura 4) rappresenta il numero di stazioni ferroviarie urbane e di stazioni di metropolitana presenti nell'origine.

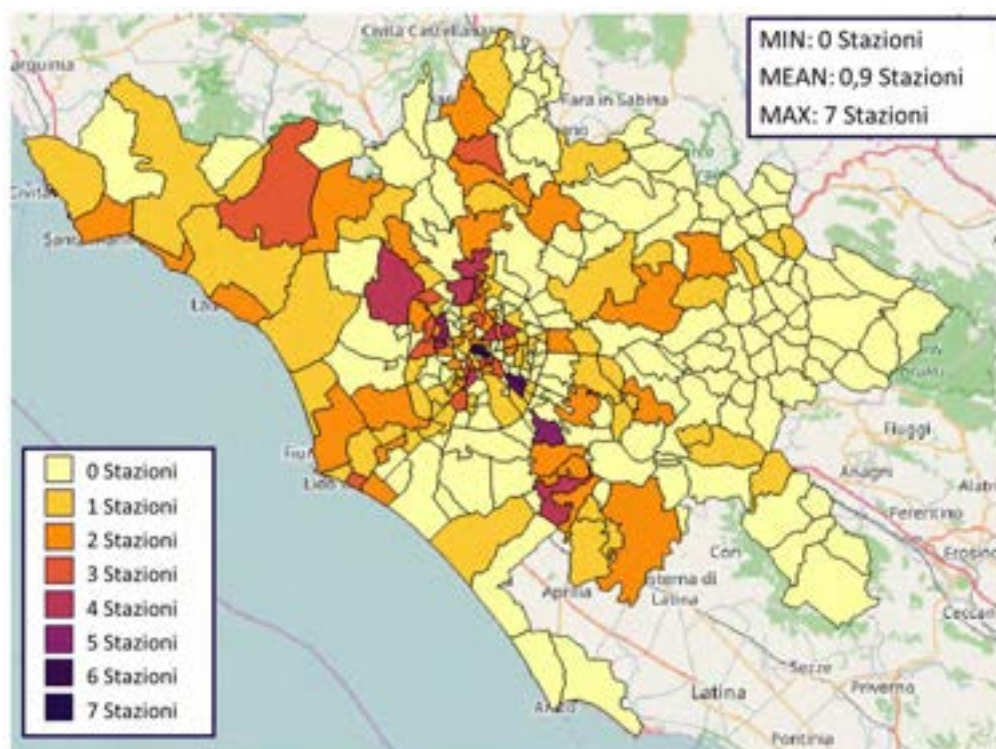


Figura 4. Numero stazioni metro/ferro (x9).

Variabili indipendenti funzione solamente dell'intervallo temporale e non dell'origine

L'ultima variabile x_{10} , è una variabile binaria (dummy) ed è funzione solamente dell'intervallo temporale e non delle origini. Rappresenta infatti la distinzione tra periodo di punta (6:00 – 11:00) e periodo di morbida (4:00 – 6:00 e 11:00 – 24:00).

A valle del processo di addestramento della RF, è stato evidenziato come le variabili x_2 e x_3 (così anche le loro analoghe x_2 bis e x_3 bis, alle precedenti strettamente correlate) non siano di fatto risultate significative, in quanto le modalità di computo dei tempi di trasporto pubblico basate sugli open data non hanno permesso di calcolare i tempi di percorrenza per le relazioni in cui interveniva una zona esterna al Comune di Roma, o in origine o in destinazione dello spostamento, a causa della mancanza del dato esterno al Comune stesso. La variabile x_4 invece, pur contenendo i tempi su trasporto pubblico, era stata tenuta all'interno della prima definizione del modello, grazie alla sua maggiore variabilità legata alla differenza rispetto ai tempi su trasporto privato [1].

Per sopperire a tali limiti, con il fine di implementare le variabili rimaste escluse dal processo di calibrazione, così come per ricalcolare in maniera più efficace la variabile x_4 , si è deciso di far uso di ulteriori fonti di dati. In particolare sono stati utilizzati i tempi su trasporto pubblico derivanti da assegnazione su modello di rete per le connessioni con l'esterno, nonché di misurare l'attrattività delle zone di destinazione tramite l'uso di matrici trasportistiche in dotazione al Laboratorio Trasporti del Dipartimento di Ingegneria [3].

Sono state quindi ricalcolate le variabili che tenevano conto dei tempi su trasporto pubblico come segue:

$x_2 =$ Impedenza sul trasporto pubblico pesata per accessibilità dei parcheggi in origine

$$x_2 = (\sum_{P \in O} f_{OP} \left(\frac{\sum_{D \in Roma} t_{PD}^{TP} A_D}{\sum_{D \in Roma} A_D} \right)) / (\sum_{P \in O} f_{OP}) \quad \text{per ogni o, per ogni Dt} \quad (7)$$

con:

t_{PD}^{TP} = tempo dal parcheggio P alla destinazione D (con destinazioni interne a Roma) tramite trasporto pubblico nell'intervallo di tempo Dt;

A_D = attrattività della zona di destinazione D (attualmente: numero di spostamenti attratti dalla zona D da matrici trasportistiche);

Rispetto dunque alla precedente definizione di x_2 riportata in (3), i tempi su trasporto pubblico non considerano tutte le destinazioni dell'area di studio, ma solo le destinazioni interne a Roma, in quanto il fenomeno di P&R in ambito urbano compete prettamente gli spostamenti di penetrazione. Inoltre, tali tempi sono stati pesati per l'attrattività della zona di destinazione al fine di considerare la distribuzione delle attività sul territorio. Con quest'ultima accortezza si fa in modo di non rendere il valore del tempo PD distribuito in maniera uniforme tra tutte le destinazioni, ma si tiene conto della differente localizzazione delle attività sul territorio. Così è possibile utilizzare il modello anche per simulare scenari di *land use* differenti rispetto alla configurazione attuale del territorio.

$x_3 =$ Impedenza sul trasporto pubblico pesata per flusso OD

$$x_3 = (\sum_{D \in Roma} f_{OD} A_D ((\sum_{P \in O} t_{PD}) / n_{P \in O})) / ((\sum_{D \in Roma} f_{OD}) (\sum_{D \in Roma} A_D)) \quad \text{per ogni o, per ogni Dt} \quad (8)$$

con:

f_{OD} = flusso FCD origine-destinazione nell'intervallo Dt considerato;

t_{PD} = tempo di viaggio tramite sistema di trasporto collettivo parcheggio-destinazione nell'intervallo Dt considerato

n_p = numero di parcheggi appartenenti all'origine o

Anche in questo caso, come nel precedente, si è deciso di pesare per l'attrattività della zona di destinazione e considerare le sole zone interne al Comune nei tempi da parcheggio a destinazione.

Infine, in maniera analoga, è stato aggiornato il beneficio temporale x4:

$$x4 = \sum_{D \in Roma} A^D (t_{OD} - (\sum_{P \in O} (t_{OP} + t_{PD}) / n_{PEO})) / \sum_{D \in Roma} A_D \text{ per ogni o, per ogni Dt} \quad (9)$$

con:

t_{OD} = tempo di viaggio origine-destinazione da FCD nell'intervallo Dt considerato

t_{PD} = tempo di viaggio tramite sistema di trasporto collettivo parcheggio-destinazione nell'intervallo Dt considerato

Di seguito si riporta un'analisi degli intervalli di variabilità delle variabili indipendenti, come presenti nel database di alimentazione per la calibrazione e validazione del modello RF:

Tabella 1. Range di variabilità delle variabili indipendenti ricalcolate attraverso l'uso di dati da simulazione e da modello.

	x2 [min]	x3 [min]	x4 [min]
	<i>Impedenza sul trasporto pubblico pesata per accessibilità dei parcheggi in origine</i>	<i>Impedenza sul trasporto pubblico pesata per flusso OD</i>	<i>beneficio temporale</i>
<i>Media</i>	20,83	20,14	-23,92
<i>Dev. standard</i>	5,77	7,00	16,61
<i>Valore Massimo</i>	37,91	42,96	8,82
<i>Valore Minimo</i>	10,82	5,90	-106,88

Calcolate le nuove variabili x2, x3 e x4, la funzione f in (1) è stata calibrata e validata (fasi di training e di test) attraverso il processo di apprendimento supervisionato denominato Random Forest (RF). Per i dettagli circa il funzionamento delle Random Forest e le procedure di training e test utilizzate è possibile fare riferimento al report della prima annualità [1].

In Tabella 2 sono riportati i test statistici a valle del processo di training che comparano i risultati stimati rispetto ai dati osservati. Il successivo confronto tra quote di P&R in input del modello e rispettivo risultato stimato, fa passare il coefficiente di determinazione sull'intero campione a 0,910 (Figura 5).

Tabella 2. Test statistici a valle del processo di training.

	RMSE	MSE	MAE	MAPE	R^2
Modello multimodale f	0,5396	0,2912	0,3467	29,2515	0,940

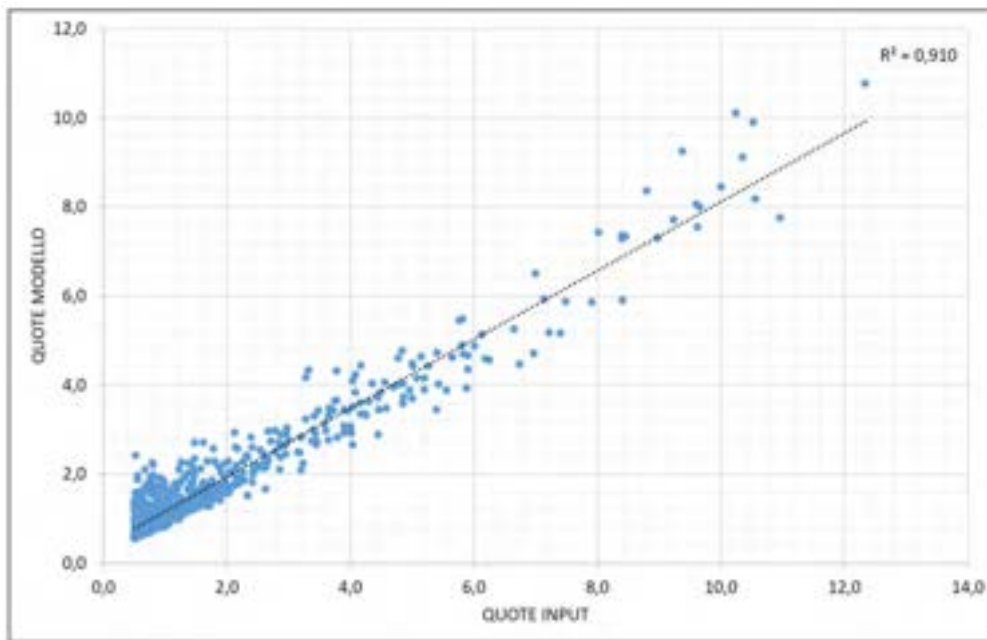


Figura 5. Confronto tra quote di P&R da dati reali e quote da modello multimodale.

Rispetto al modello multimodale calibrato nel corso della prima annualità, che prescindeva dal considerare le variabili esplicative contenenti i tempi sul trasporto pubblico, i test statistici migliorano in quest’ultimo caso sensibilmente, portando ad una migliore rispondenza tra dati reali e output da modello:

Tabella 3. Confronto tra modello multimodale finale e modello senza variabili esplicative contenenti i tempi sul trasporto pubblico.

	RMSE	MSE	MAE	MAPE	R ²
Modello multimodale f (prima annualità)	0,8599	0,7394	0,4597	30,9498	0,903
Modello multimodale f (seconda annualità)	0,5396	0,2912	0,3467	29,2515	0,940
Variazione indicatori [%]	-37%	-61%	-25%	-5%	+4%

Ne risulta un modello finale che vede di fatti una riduzione degli indicatori statistici misuranti lo scarto tra dati osservati e simulati anche superiore al 50% (l’errore quadratico medio – MSE - passa di fatti da 0,74 del modello calibrato nella prima annualità a 0,29 del modello calibrato nella seconda annualità).

In Tabella 4 sono riportati i valori dei pesi relativi all’importanza delle singole variabili nel modello implementato: questi permettono di stabilire quali variabili indipendenti hanno maggiore potere predittivo. L’esame di tali pesi può indicare eventuali criticità del modello nel caso in cui le variabili tradizionalmente più importanti contribuiscano poco alla spiegazione del fenomeno. Tale caso potrebbe determinarsi qualora esista una inadeguata specificazione del modello o eventuali criticità sull’accuratezza dei dati utilizzati.

L’esame dei pesi associati alle singole variabili utilizzate evidenzia come il riempimento dei parcheggi (x5, valore peso: 0,2652), dunque la relazione tra domanda ed offerta di sosta, risulti la variabile esplicative fondamentale nel regolare la quota di spostamenti di Park & Ride; altrettanto importanti sono le variabili esplicative dell’accessibilità garantita dal sistema di trasporto collettivo (x2 ed x3, valori pesi variabili

interessate rispettivamente: 0,2021; 0,1168), il beneficio temporale tra uso della sola modalità privata o tramite scambio privato-pubblico (x4, valore peso: 0,094) e l'accessibilità dei parcheggi tramite mezzo privato (x1, valore peso: 0,0881). È di fatti ragionevole che non ci possa essere incremento della domanda di sosta se i parcheggi lavorano a capacità o se la fase di accesso tramite trasporto privato o di viaggio tramite trasporto pubblico hanno un'impedenza elevata. Anche la dimensione delle zone e la popolazione che risiede nelle singole zone incidono sul flusso in accesso ai parcheggi (x7 ed x6, valori pesi rispettivamente: 0,0790; 0,0932).

Il riempimento dei parcheggi risultava la variabile esplicativa principale anche nel modello calibrato alla prima annualità (Tabella 5); viceversa, le variabili x4 ed x1 che concorrevano alla spiegazione del fenomeno in maniera paritaria, nel modello finale hanno un'influenza minore a vantaggio delle due impedenze sul trasporto pubblico (x2 ed x3). Il numero di stazioni metro/ferro presenti in ogni zona (x9) mantengono simile peso tra i due modelli calibrati, così come le dummy x8 e x10 restano poco influenti, potenzialmente a causa della loro struttura (variabili binarie).

Tabella 4. Peso delle singole variabili indipendenti nella spiegazione del fenomeno.

Variabile	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Denominazione variabile	<i>Impedenza trasporto privato</i>	<i>Impedenza trasporto pubblico (1)</i>	<i>Impedenza trasporto pubblico (2)</i>	<i>Beneficio Temporale</i>	<i>Riempimento parcheggi</i>	<i>Estensione zone</i>	<i>Densità abitativa</i>	<i>Dentro/fuori GRA</i>	<i>Numero stazioni metro/ferro</i>	<i>Punta/morbida</i>
Pesi	0,0881	0,2021	0,1168	0,0940	0,2652	0,0790	0,0932	0,0040	0,0555	0,0020

Tabella 5. Confronto pesi tra modello multimodale finale e modello senza variabili esplicative contenenti i tempi sul trasporto pubblico.

Variabile	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Denominazione variabile	<i>Impedenza trasporto privato</i>	<i>Impedenza trasporto pubblico (1)</i>	<i>Impedenza trasporto pubblico (2)</i>	<i>Beneficio Temporale</i>	<i>Riempimento parcheggi</i>	<i>Estensione zone</i>	<i>Densità abitativa</i>	<i>Dentro/fuori GRA</i>	<i>Numero stazioni metro/ferro</i>	<i>Punta/morbida</i>
Pesi (modello multimodale f prima annualità)	0,0881	0,2021	0,1168	0,0940	0,2652	0,0790	0,0932	0,0040	0,0555	0,0020
Pesi (modello multimodale f seconda annualità)	0,1566	-	-	0,1533	0,3516	0,1234	0,1492	0,0083	0,0509	0,0067

Dall'analisi delle zone che presentano una migliore riproduzione del fenomeno è possibile notare come queste si vengano a trovare proprio lungo le principali direttrici del sistema su ferro (Figura 6): di fatti, internamente al comune di Roma, esse si collocano a ridosso e subito esterne al Grande Raccordo Anulare lungo gli assi delle linee ferroviarie (e dei relativi parcheggi di scambio) della Roma – Lido, della Roma - Viterbo e della FL3. Riducendo il margine di corrispondenza tra le quote di P&R misurate e quote simulate da modello (Figura 7), le zone si infittiscono attorno alle precedenti, inglobando aree del Comune lungo la rete metropolitana.

LA numerosità delle zone con MAPE tra modello e dato da FCD inferiore al 10% che si trovano all'interno del bacino di influenza dei parcheggi di scambio (considerando un raggio di 3 km attorno al singolo parcheggio) per singola direttrice e loro localizzazione è riportata in Tabella 6 e Figura 12. Nel caso di MAPE con limite al 30%, si veda Tabella 6 e Figura 13.

Soffermandosi ai valori assunti dalle quote di P&R tra le 6:00 e le 10:00, ore appartenenti alla fascia di punta mattutina in cui ci si aspetta di trovar anche i maggiori valori delle quote di domanda di P&R in partenza dalle

singole zone, il valore medio della domanda di P&R da modello si attesta sul 2,4% della domanda generata con un valore massimo pari a 10,8% e un valore minimo pari a 0,6%.

Tabella 6. Numerosità delle zone con migliore riproduzione del dato di domanda da FCD nel bacino di influenza dei parcheggi di scambio, per singola direttrice.

Direttrice	Numero di zone	
	MAPE<10%	MAPE<30%
FL3	15	29
Roma-Lido	15	28
Roma-Viterbo	4	8
FL1	19	39
Metro A	18	31
Metro B	22	41

Nelle zone a cui corrisponde una migliore riproduzione del dato di domanda di P&R tra modello e dato FCD (zone con MAPE inferiore al 10%, Figura 8), le statistiche ottenute da modello (valore medio, minimo e massimo) non si discostano dai valori medi dell'intero campione. Alcune differenze, seppur minimali, rispetto al dato reale possono riscontrarsi nella distribuzione delle frequenze (Figura 8 e Figura 9), dove si evidenziano variazioni tra classi contigue con conseguenti lievi sovrastime-sottostime.

Aumentando il range di errore considerato tra modello e dati (MAPE <30%), si verifica un contenimento dei valori massimi di P&R registrati (anche pari al 12%) verso quote da modello di massimo il 10% (si veda Figura 10 e Figura 11).

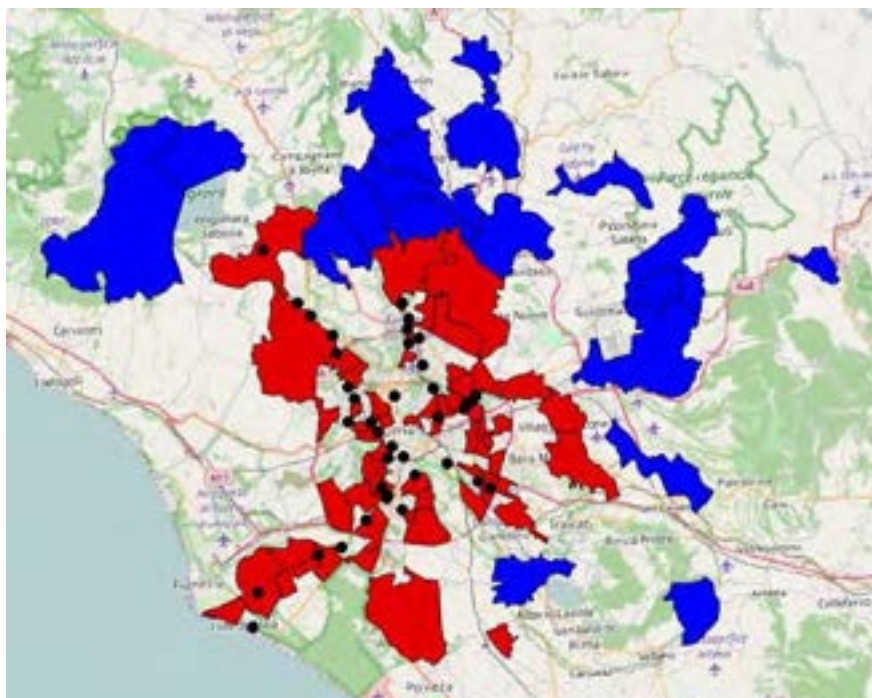


Figura 6. Zone con MAPE < 10% differenziate tra zone interne al Comune (rosse) e zone esterne (blu).

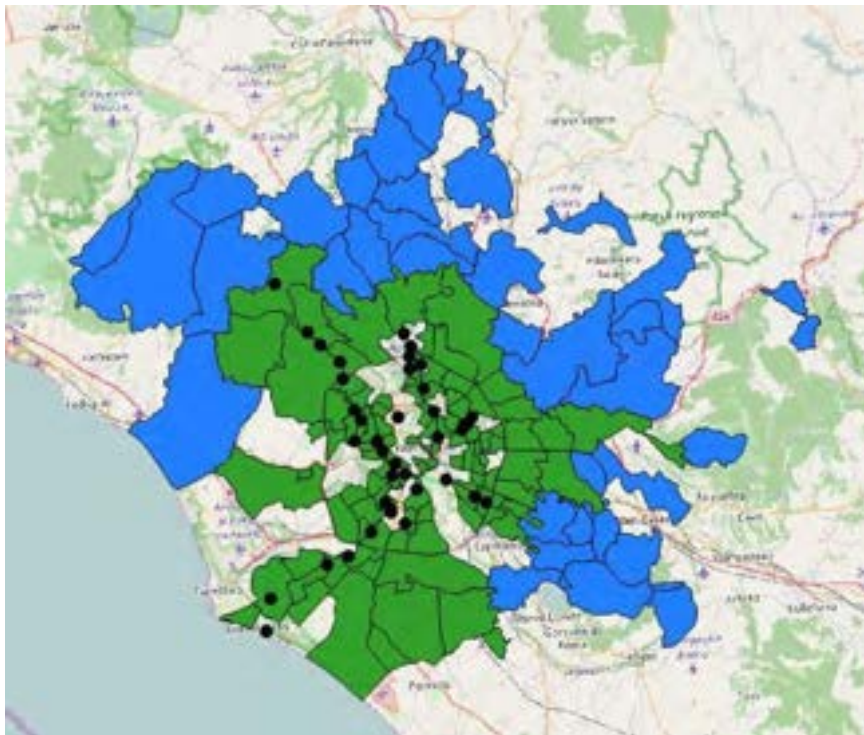


Figura 7. Zone con MAPE < 30% differenziate tra zone interne al Comune (verde) e zone esterne (azzurro).

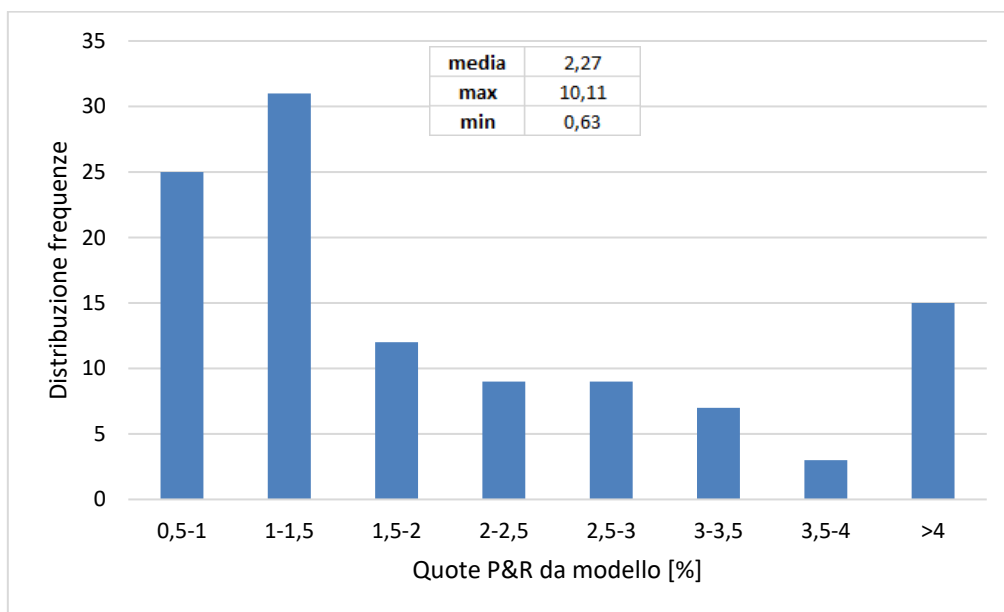


Figura 8. Distribuzione delle quote di P&R da modello per le sole zone con MAPE < 10% (fascia oraria 6:00-10:00).

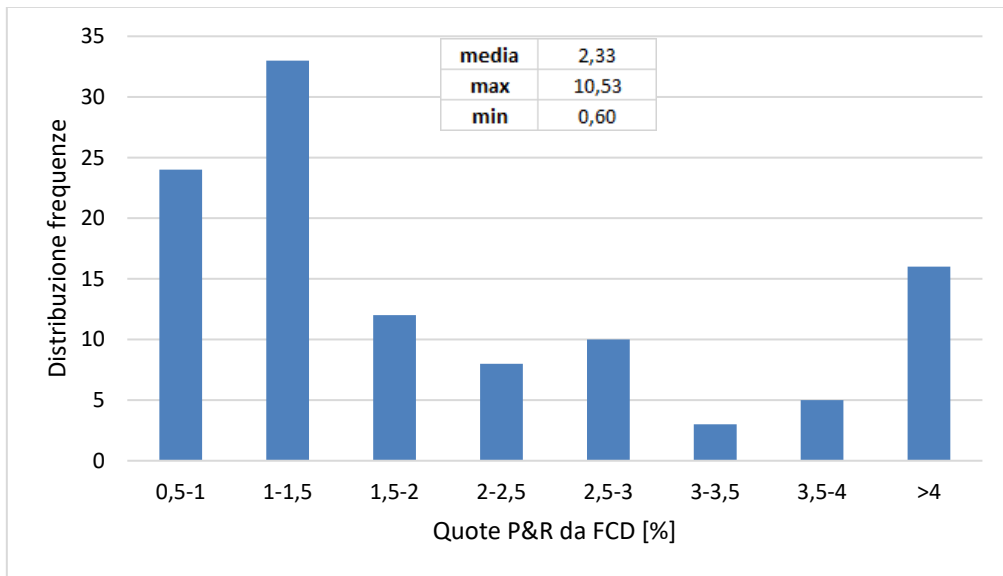


Figura 9. Distribuzione delle quote di P&R da FCD per le sole zone con MAPE < 10% (fascia oraria 6:00-10:00).

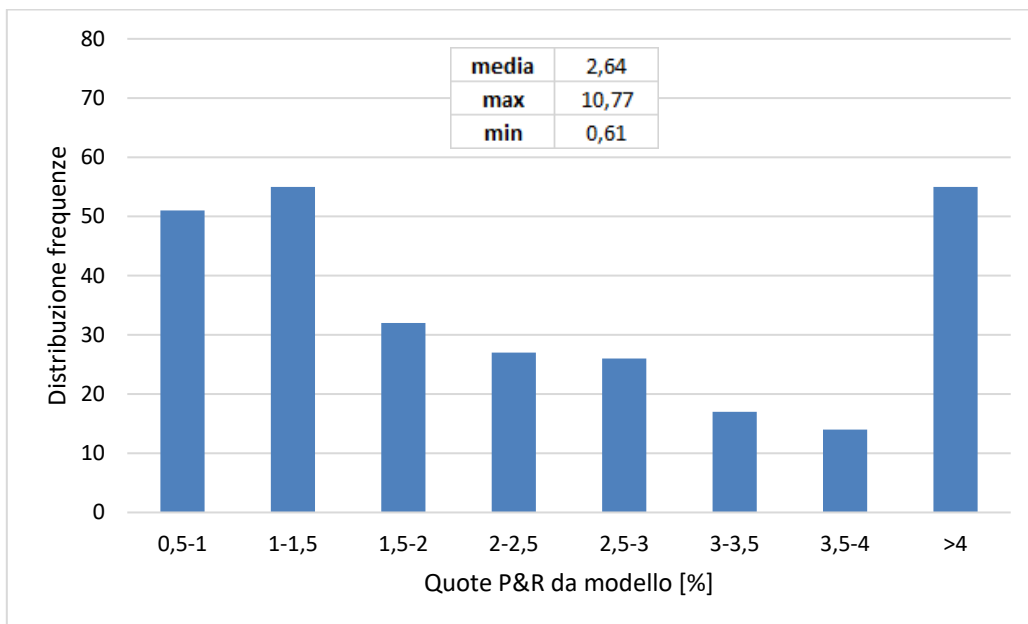


Figura 10. Distribuzione delle quote di P&R da modello per le sole zone con MAPE<30% (fascia oraria 06:00-10:00)

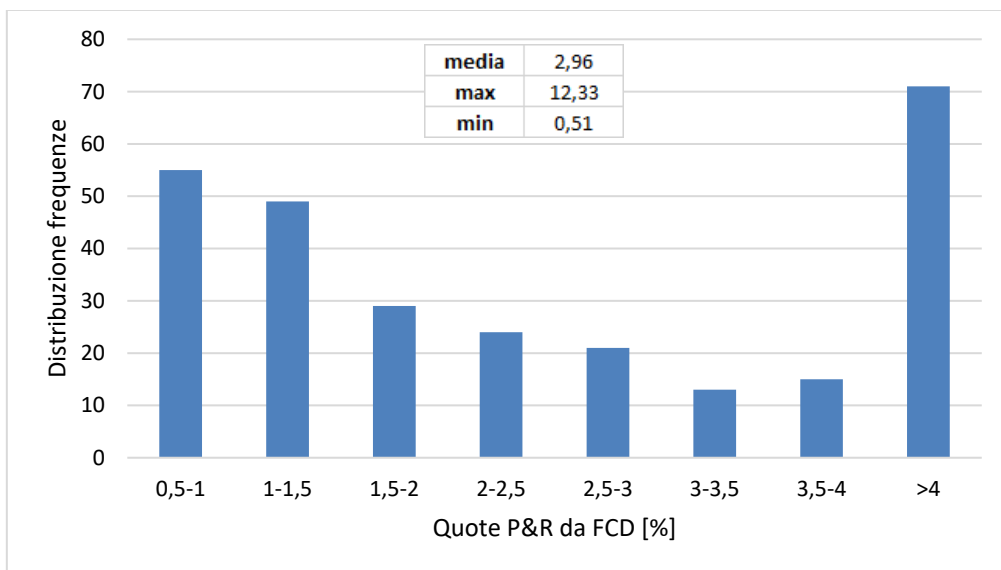


Figura 11. Distribuzione delle quote di P&R da FCD per le sole zone con MAPE<30% (fascia oraria 06:00-10:00)

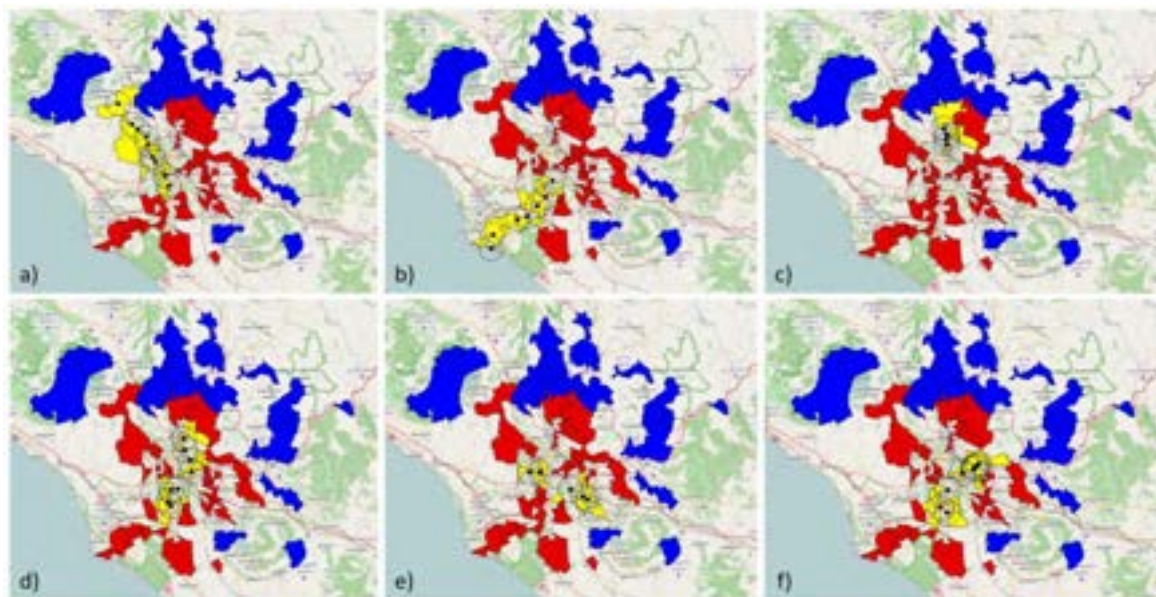


Figura 12. Zone con MAPE < 10% che ricadono nel raggio di influenza dei parcheggi di scambio per la direttrice FL3 Roma-Capranica-Viterbo (a); Roma-Lido (b); Roma-Civita Castellana-Viterbo (c); FL1 Orte-Fiumicino (d); Metro A (e); Metro B (f).

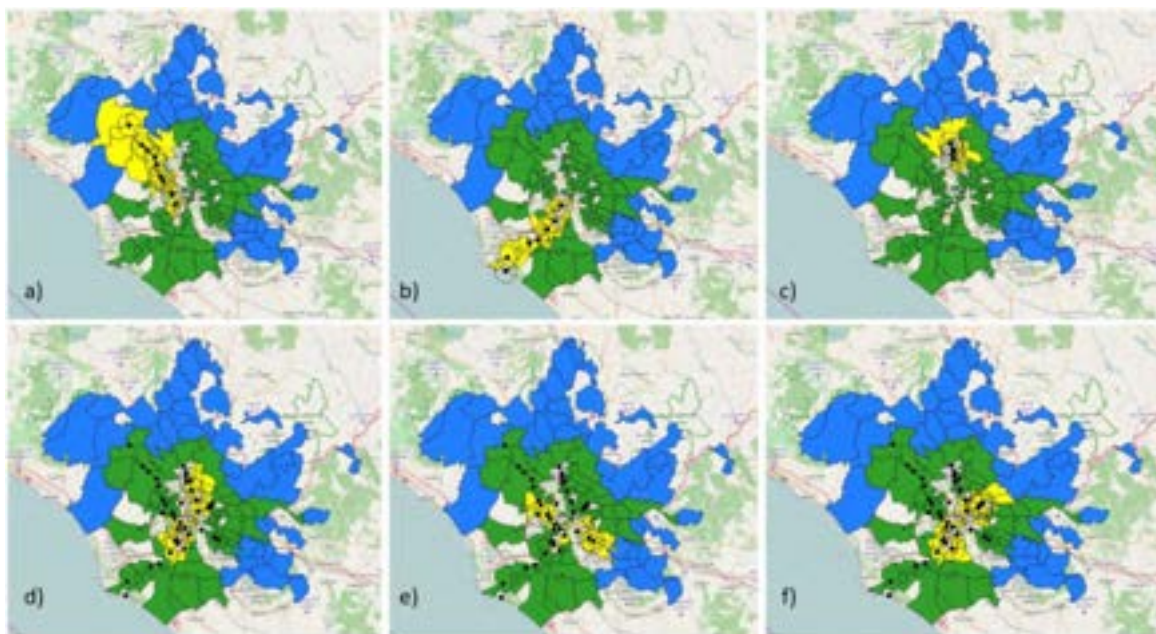


Figura 13. Zone con MAPE < 30% che ricadono nel raggio di influenza dei parcheggi di scambio per la direttrice FL3 Roma-Capranica-Viterbo (a); Roma-Lido (b); Roma-Civita Castellana-Viterbo (c); FL1 Orte-Fiumicino (d); Metro A (e); Metro B (f).

2.1.1 Test e sensitività

Il modello è stato oggetto di numerosi test: il primo di questi ha riguardato un’analisi di sensitività sui parametri che regolano il processo di apprendimento della Random Forest, ovvero il numero di alberi e la profondità massima dell’albero (“max_depth”, [1]). Al primo parametro, numero di alberi, è associata la stabilità del modello come la sua complessità computazionale; al secondo parametro, massima profondità, è associato invece il maggiore o minore rischio di overfitting. Per stabilire il valore ottimale di tali parametri sono state effettuate numerose prove di calibrazione del modello RF al variare del numero di alberi tra 50 e 2’000 e della massima profondità tra 10 e 500 livelli ed è stata valutata la maggiore o minore rispondenza dei risultati ai dati reali. Le analisi dei risultati hanno quindi individuato nei valori di 2’000 alberi e 20 livelli di massima profondità i valori ottimali dei parametri investigati (Figura 14), sia in termini di riproduzione del dato reale che in termini di stabilità del modello.

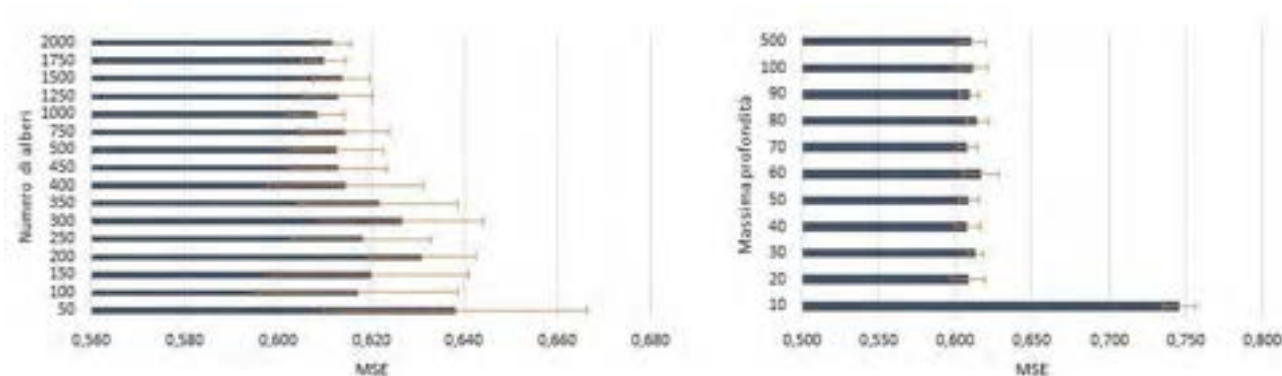


Figura 14. MSE del modello RF per diverso numero di alberi (sinistra) e per diversa profondità (destra) e relativa deviazione standard.

Il secondo test ha riguardato l'analisi di sensitività delle variabili con particolare riferimento al riempimento dei parcheggi, variabile principale del modello, e all'accessibilità del sistema di trasporto. In entrambi i casi sono state selezionate tre zone, tra quelle con maggior grado di rispondenza tra dato reale e da modello, e sono state effettuate delle variazioni sistematiche dei dati che permettono il computo delle rispettive variabili. Le tre zone selezionate sono Tor Sapienza, Ostia Antica e Prima Porta, delle quali due (Tor Sapienza ed Ostia Antica) erano già state utilizzate nel corso della prima annualità del progetto, ma per valutare la capacità di risposta del modello a sole variazioni puntuali delle variabili.

Partendo dall'analisi dei risultati in termini di riempimento di parcheggi afferenti alle zone investigate (Figura 15), si evidenzia come la variazione della quota di P&R in una zona mostra un andamento non lineare con il livello di riempimento dei parcheggi afferenti alla zona stessa. In particolare sembrerebbe evidenziarsi un comportamento analogo a quanto accade nella relazione fondamentale del deflusso tra le grandezze flusso veicolare e densità [2]: a parità di quota di P&R si individuano due stati, uno stato stabile ed uno stato instabile, quest'ultimo si verifica nell'approcciarsi delle condizioni "medie" di sovrasaturazione dei parcheggi di zona. Ovviamente, tali condizioni "medie" variano potenzialmente di zona in zona e rappresentano un valore d'area, così come accade nel caso di diagramma macroscopico fondamentale d'area.

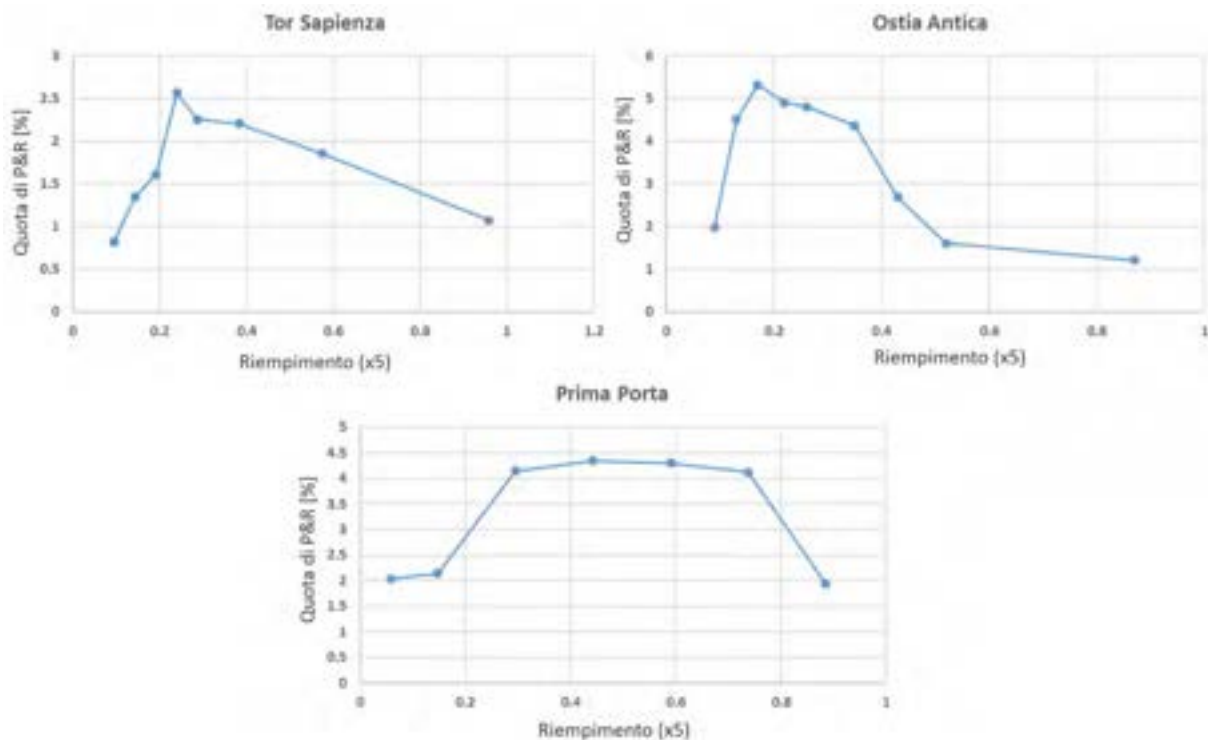


Figura 15. Risposta del modello al variare del livello dei riempimenti dei parcheggi afferenti alla zona di analisi.

Per l'analisi sull'accessibilità del sistema di trasporto (Figura 16), si è deciso di lavorare su variazioni sistematiche dei tempi di accesso tramite trasporto privato, in quanto, agendo su tali tempi è possibile far variare sia la variabile x_1 che la variabile x_4 , rappresentative la prima dell'accessibilità tramite trasporto privato e la seconda proprio della differenza in accessibilità intercorrente tra sistema di trasporto privato e sistema di trasporto collettivo. Le variazioni a cui sono stati soggetti i suddetti tempi variano da -40% sino a +200%. Oltre il 200% di incremento, l'analisi non viene proseguita se si è raggiunta una stabilità del risultato in termini di quota di P&R.

I risultati di questa seconda analisi (Figura 16) mostrano che esiste una maggiore elasticità del modello per un incremento dei tempi sino a +50%. Mediamente, ciò si traduce in una riduzione della quota di P&R se

l'accessibilità dei parcheggi di scambio della zona considerata peggiora dai 10 ai 20 minuti. Viceversa, la variazione della quota di P&R diviene meno sensibile per variazioni dei tempi maggiori del 50%.

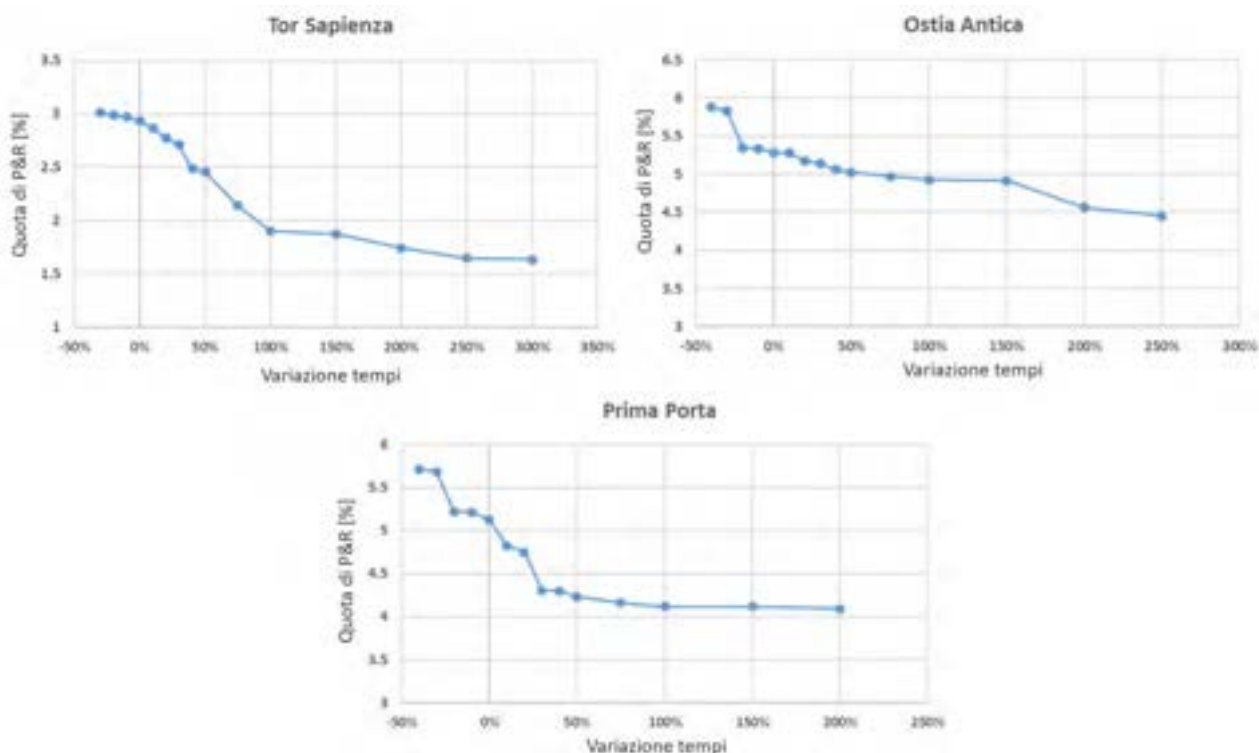


Figura 16. Risposta del modello al variare dei tempi di raggiungimento dei parcheggi afferenti alla zona di analisi.

2.2 Incentivi economici per la multimodalità e schemi Vehicle To Grid

Nel modello precedentemente calibrato e validato è stata affiancata e proposta una metodologia per l'introduzione di incentivi atti a favorire l'uso delle postazioni di ricarica presso i parcheggi di scambio da parte dei veicoli elettrici, andando dunque ad incrementare l'attrattività dei parcheggi stessi e dello scambio verso il sistema di trasporto collettivo. Tali incentivi potranno derivare da eventuali sconti sul costo dell'abbonamento al sistema di trasporto collettivo, così come ad eventuali sconti sulla bolletta elettrica. In quest'ultimo caso si ipotizza che i veicoli elettrici fermi nei parcheggi possano cedere parte della loro energia alla rete (schemi di Vehicle To Grid). Ciò deve ovviamente configurarsi in un pagamento di tale energia ceduta, o alternativamente in uno sconto sulla bolletta elettrica.

Nel modello, le suddette politiche possono essere incorporate introducendo una funzione aggiuntiva che lega la domanda di P&R con l'incentivo economico come riportato in (1) e di seguito ripresa:

$$(G_0^{Park} / G_0) |_{Dt} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + I(\text{Beneficio } \text{€}) \tag{10}$$

Dove:

$$\text{Beneficio } \text{€} = g(\text{sconto costo TP; sconto sulla bolletta elettrica}) \tag{11}$$

E:

$$\text{Sconto sulla bolletta elettrica} = e(\text{distribuzione dei tempi di permanenza nei parcheggi del bacino della zona di origine, distribuzione delle distanze di accesso ai parcheggi del bacino della zona di origine}) \tag{12}$$

La (12) evidenzia come il beneficio economico dovuto allo sconto sulla bolletta elettrica sia funzione di quanto i veicoli elettrici rimangono in sosta ai parcheggi e di quali siano le distanze percorse per accedere ai parcheggi stessi e per rientrare nel punto di origine. Si ricorda infatti che gli spostamenti di Park & Ride sono per loro natura prettamente spostamenti sistematici del tipo casa-lavoro. Dunque il singolo veicolo elettrico, nell'ipotesi di ricarica notturna a casa, arriverà al parcheggio con un quantitativo di energia pari alla massima energia accumulata decurtata dell'energia necessaria a raggiungere il parcheggio stesso. L'ipotesi di ricarica notturna è avallata dagli studi di [8], dove si riporta come la maggior parte dei veicoli elettrici (dati raccolti negli anni 2010-2012 in Australia) si ricarichino una volta giunti presso il luogo di lavoro o di residenza. Anche in [9] è evidenziato come i veicoli elettrici si ricarichino principalmente a casa.

Una volta giunto presso il parcheggio di scambio, nel caso di schema Vehicle To Grid, al veicolo potrà essere prelevato un quantitativo di energia massima tale da assicurare un valore residuo necessario al rientro a casa, tenuto conto di un opportuno fattore di sicurezza. Circa la relazione tra distanza da percorrere e livello di carica della batteria, indagini recentemente condotte a Pechino (Cina) hanno verificato che circa il 56% degli utenti che guidano veicoli elettrici auspica che il veicolo sia carico in maniera tale da coprire per lo meno una volta e mezza la distanza da effettuare.

A prescindere dal valore potenzialmente prelevabile di energia, il singolo utente sarà disposto a tale prelievo in funzione del quantitativo di sconto (ricavo) ottenibile.

Dunque la metodologia prevista per la valutazione dell'incremento I dovuto al beneficio sullo sconto in bolletta sarà:

- date le distanze medie di accesso (nonché di egresso) ai parcheggi del bacino dell'origine considerata:
 - a. si definisce un quantitativo di energia prelevabile [kWh] nei parcheggi del bacino dell'origine nella fascia di punta mattutina (i parcheggi sono considerati a capacità e la (10) di conseguenza viene valutata per la sola D_t pari alla fascia di punta mattutina);
 - b. fissato il costo unitario dell'energia [€/kWh] e data l'energia prelevabile [kWh], si computa il beneficio economico complessivo ottenibile [€];
 - c. dato il beneficio economico ottenibile [€], si individua l'incremento potenziale di domanda (I).

Distanze medie di accesso e tempi medi di permanenza nei parcheggi sono tutte informazioni note da dato FCD: in particolare, tramite dati FCD è possibile ricavare i km in media percorsi dagli utenti per raggiungere i parcheggi appartenenti all'origine considerata (si ricorda che il modello in (10) lavora a livello di singola zona d'origine) e, di conseguenza, il consumo medio di energia con cui essi raggiungono i parcheggi. I tempi medi di permanenza permettono invece di valutare la finestra temporale in cui i veicoli sono potenzialmente disponibili al prelievo, anche se per spostamenti di Park & Ride, il tempo medio di sosta ai parcheggi è di norma superiore alle 6 ore.

Per il costo unitario dell'energia, si è fatto riferimento ai prezzi unitari relativi al sistema di "scambio sul posto", mutuando l'espressione per il calcolo dell'incentivo economico adottato nel caso dei pannelli fotovoltaici (Articolo 6, DL 387/03, [4]). Questo in quanto non sono all'attualità disponibili valori di riferimento, né modelli di calcolo per incentivi in schemi di *Vehicle To Grid*. Maggiori dettagli sul sistema di "scambio sul posto" sono riportati nel paragrafo 2.2.1, mentre l'applicazione di tale procedura per il calcolo dell'incentivo massimo ottenibile per un veicolo che cede energia presso il parcheggio di scambio è riportata nel paragrafo 2.2.2.

2.2.1 Scambio sul posto: riferimenti normativi e computo del costo unitario

Il servizio di scambio sul posto è una forma di autoconsumo in sito che permette di compensare l'energia elettrica prodotta e immessa in rete in un certo momento con quella prelevata e consumata in un momento differente da quello in cui avviene la produzione. Nello scambio sul posto il sistema elettrico viene utilizzato come uno strumento per l'immagazzinamento virtuale dell'energia elettrica prodotta ma non contestualmente autoconsumata. Condizione necessaria per l'erogazione del servizio di scambio sul posto è la presenza di impianti per il consumo e per la produzione di energia elettrica sottesi a un unico punto di connessione con la rete pubblica (Testo unico ricognitivo della produzione elettrica, 2018, [10]).

Il servizio di scambio sul posto è stato inizialmente previsto dall'articolo 10, comma 7, secondo periodo, della legge n. 133/99, per gli impianti alimentati da fonti rinnovabili di potenza elettrica non superiore a 20 kW e successivamente confermato dall'articolo 6 del decreto legislativo n. 387/03 [4].

Nell'articolo 6 di tale decreto è consentito che l'energia elettrica prodotta possa essere remunerata a condizioni economiche di mercato per la parte immessa in rete e nei limiti del valore eccedente il costo sostenuto per il consumo di energia.

Gli aspetti normativi legati allo scambio sul posto si sono evoluti nel tempo, estendendosi agli impianti alimentati da fonti rinnovabili di potenza superiore a 20 kW (si veda a tal fine legge n. 116/14).

L'utente dello scambio sul posto acquista l'intera quantità di energia elettrica prelevata da un qualsiasi venditore e sigla con il Gestore dei Servizi Energetici (GSE) la convenzione per lo scambio sul posto; sulla base di tale convenzione il GSE prende in consegna l'intera quantità di energia elettrica immessa, vendendola sul mercato e regolando i contratti di trasporto e di dispacciamento. Il GSE, sempre nell'ambito della convenzione per lo scambio sul posto, eroga all'utente dello scambio un contributo finalizzato:

1. alla compensazione economica tra il valore associato all'energia elettrica immessa in rete e il valore associato all'energia elettrica prelevata;
2. alla restituzione dei corrispettivi tariffari, per una quantità di energia elettrica prelevata al più pari a quella immessa (energia elettrica scambiata), della parte variabile, espressa in c€/kWh, dei corrispettivi relativi all'utilizzo della rete (trasmissione, distribuzione e dispacciamento).

Mentre il riconoscimento della compensazione economica deriva dalla valorizzazione dell'energia elettrica immessa in rete, la restituzione dei corrispettivi tariffari rappresenta l'incentivo intrinseco nella disciplina dello scambio sul posto. È come se l'energia elettrica immessa in rete e successivamente ri-prelevata fosse stata prodotta e autoconsumata istantaneamente senza utilizzare la rete (mentre nella realtà tale rete è stata utilizzata). Ciò significa che i costi non sostenuti dai soggetti che richiedono lo scambio sul posto rimangono in capo a tutti gli utenti del sistema elettrico.

Il procedimento per il calcolo del contributo in conto scambio CS erogato dal GSE, nell'ambito della convenzione per lo scambio sul posto, segue precise criteri che si declinano in funzione del tipo di utenza e tensione, nonché del tipo di impianto installato (fonti rinnovabili, cogenerazione e relativa potenza).

Ai fini del presente studio, il calcolo è stato sintetizzato come segue:

$$CS = \min (PUN * E_p; MGP * E_i) + CUS * E_s \quad (13)$$

Dove:

E_p è l'energia elettrica prelevata dall'utente dello scambio [kWh];

PUN è il prezzo unico nazionale, ovvero il prezzo di riferimento dell'energia elettrica rilevato sulla borsa elettrica italiana espresso in [€/kWh];

E_i è l'energia elettrica immessa in rete dall'utente dello scambio [kWh];

MGP è il prezzo zonale orario sul mercato del giorno prima, espresso in [€/kWh];

E_s è la quantità di energia elettrica scambiata, espressa in [kWh], e pari al minimo tra la quantità di energia elettrica immessa e la quantità di energia elettrica prelevata;
 CUS è il corrispettivo unitario di scambio forfetario annuale, espresso in [€/kWh].

Ed i valori dei prezzi unitari PUN, MGP e CUS sono stati posti pari a:

Tabella 7. Valori dei prezzi unitari per l'applicazione del contributo allo scambio sul posto.

	[€/kWh]	Rif	Fonte
PUN	0,04939*	Aprile 2018	Gestore dei mercati energetici (GME)/ www.mercatoelettrico.org
MGP	0,04629**	prezzo zonale centro sud 2 Aprile 2018	Gestore dei mercati energetici (GME)/ http://www.mercatoelettrico.org
CUS	0,06***	2017	Autorità per l'energia elettrica, il gas e il sistema idrico

*variabile su base mensile
 **variabile su base giornaliera
 ***si è preso a riferimento il valore corrispondente alla metà del CUS previsto per impianti fotovoltaici con $20 < P < 200$ kW

2.2.2 Computo dell'incentivo economico per Vehicle To Grid presso i parcheggi di scambio

L'applicazione del computo dell'incentivo ottenibile nel caso di schema *Vehicle To Grid* presso i parcheggi di scambio è stata realizzata mutuando l'espressione (13) al caso specifico di studio.

Si ipotizza l'uso di un veicolo elettrico tipo Nissan Leaf con capacità della batteria di 24 kWh e un consumo medio di 0.1657kWh/km. Si noti che le attuali vetture elettriche si stanno spingendo verso capacità sempre maggiori di batteria (la Nissan Leaf modello 2018 ha pressoché raddoppiato la sua capacità) e dunque i valori utilizzati nel presente studio rappresentano un limite minimo per il computo.

Supponendo che l'utente carichi totalmente la batteria della propria auto durante la notte, all'arrivo al parcheggio questi avrà una quantità di energia pari alla capacità del veicolo meno la distanza percorsa per il consumo, ovvero:

$$\text{Capacità [kWh]} - \text{Distanza OP [km]} * \text{Consumo Medio [kWh/km]} \quad (14)$$

La quantità massima prelevabile e che dunque sarà immessa in rete (E_i) si assume pari all'energia rimasta nella batteria, meno l'energia necessaria allo spostamento di rientro (parcheggio-casa) più una soglia addizionale di sicurezza α (Figura 17). Dunque:

$$E_i = \text{Energia Prelevabile [kWh]} = \text{Capacità [kWh]} - \{(\text{Distanza OP [km]} + \alpha \text{Distanza PO [km]})\} * \text{Consumo Medio [kWh/km]} \quad (15)$$

Nel caso di matrice simmetrica delle distanze e soglia di sicurezza pari proprio alla distanza necessaria al rientro a casa, la formula può essere semplificata come segue:

$$E_i = \text{Energia Prelevabile [kWh]} = \text{Capacità [kWh]} - 3 * \text{Distanza Media [km]} * \text{Consumo Medio [kWh/km]} \quad (16)$$

Il calcolo è stato testato considerando una distanza media di accesso/egresso al/dal parcheggio di scambio di 10 km, distanza che si rifà a quanto ottenuto nell'analisi dei dati FCD al caso romano, soprattutto in relazione all'accesso ai parcheggi collocati in posizione estrema rispetto alla rete del trasporto su ferro.

Per il singolo veicolo, tramite la (16), è possibile calcolare il livello massimo di energia prelevabile E_i che risulta pari a circa 4'800 kWh in un anno (considerando 253 giorni lavorativi all'anno). L'energia elettrica prelevata E_p dall'utente è invece pari all'energia necessaria ogni giorno per ricaricare il veicolo, considerando quanta energia viene ad essere prelevata nello schema *Vehicle To Grid* e la soglia di sicurezza che garantisce di non

rimanere a batteria completamente scarica. Tale valore, sotto le ipotesi illustrate, si attesta a circa 5'700 kWh in un anno.



Figura 17. Computo energia massima prelevabile per schemi Vehicle To Grid ai parcheggi di scambio.

Dunque attraverso la (13), note E_i ed E_p e utilizzando i valori riportati in Tabella 7, la stima del possibile incentivo economico o sconto in bolletta potrebbe ammontare a circa 500€/anno.

Lo scambio sul posto è un fenomeno sicuramente differente da quanto accadrebbe al veicolo elettrico disposto a cedere parte della sua energia presso un parcheggio di scambio in un’ottica *Vehicle To Grid*. Nello scambio sul posto è prevista produzione ed immagazzinamento di energia, mentre nel caso considerato si parla solo di immagazzinamento. In entrambi i casi però è prevista la cessione di energia alla rete a fronte di un incentivo economico e dunque il modello di computo del contributo allo scambio è stato reputato il modello più verosimile per ricavare un valore di riferimento per l’incentivo economico nel caso di studio.

Tali risultati rappresentano sicuramente una frontiera di possibile sviluppo per la ricerca di sistema elettrico. Di fatti, questo incentivo economico così calcolato viene ad essere una soglia di riferimento su cui attivare uno studio di tipo comportamentale con il fine di valutare la disponibilità dei *drivers* ad accettare e a partecipare ad una politica di *Vehicle To Grid*, nonché l’elasticità della domanda di P&R all’incremento dell’incentivo economico. Dal punto di vista dell’approccio modellistico da utilizzare per tale sviluppo, si suggerisce un approccio che coinvolga il reperimento di dati comportamentali tramite indagini di tipo *Stated Preferences* (SP), trovandosi di fronte a scenari futuri che coinvolgono un tasso di penetrazione elevata dei veicoli elettrici e per i quali non è possibile ottenere un campione significativo in termini di preferenze rilevate a livello nazionale.

2.3 Simulazione di scenari per la riduzione della congestione, il contenimento dei picchi e la redistribuzione della domanda di energia

Il modello, calibrato e validato, è stato utilizzato per valutare differenti scenari di politiche trasportistiche volte alla multi modalità per la riduzione della congestione, la redistribuzione della domanda di energia, il contenimento dei picchi e la stabilizzazione della rete. In particolare sono stati simulati due scenari di politiche trasportistiche:

1. Scenario 1: incentivazione e miglioramento della rete del trasporto collettivo al fine di incrementarne l'utilizzo dei servizi in termini di P&R;
2. Scenario 2: politiche di limitazione degli ingressi in "aree sensibili" della città.

Nel primo scenario, sono state simulate differenti azioni che si ripercuotono in un miglioramento incrementale dei tempi sulla rete del trasporto collettivo. Tali miglioramenti vengono simulati nel modello attraverso la riduzione della variabile relativa ai tempi dai parcheggi di scambio sino a destinazione finale dello spostamento (t_{PD}^{TP}) da 0 a -50% (con passi da 10) rispetto ai valori attuali. Ciò comporta sia una riduzione delle impedenze su trasporto collettivo x2 ed x3 come riportate in (7) ed (8), sia un miglioramento del beneficio temporale x4 in (9) a favore del trasporto collettivo. Le variazioni delle precedenti variabili possono essere in particolare associate ad azioni quali l'incremento delle frequenze dei servizi di trasporto pubblico (sia su ferro che su gomma) o in generale all'ottimizzazione della rete (sia variazioni delle frequenze per il ferro e la gomma che miglioramento dei percorsi per la rete di adduzione).

Nel secondo scenario, si simula invece la limitazione all'ingresso per diverse quote di veicoli verso due aree centrali della città di Roma, definite attraverso due alternative di cordone. Tali cordoni derivano dai confini identificati dall'Agenzia della Mobilità del Comune di Roma [5] per la possibile applicazione di politiche di *congestion pricing* ed identificano una prima area relativa al centro storico (estensione: 22 km², Figura 18, Tabella 8) ed una seconda area (40 km², Figura 18, Tabella 8) che ingloba la precedente (Figura 19) e si estende sino all'anello ferroviario.



Figura 18. Rappresentazione delle aree identificate dal cordone C1 e dal cordone C2 (Scenario 2).

La limitazione degli ingressi è stata simulata per due differenti quote di veicoli: una quota ridotta e pari al 24% ed una quota più ingente e pari al 41%. Tali valori sono stati mutuati prendendo a riferimento rispettivamente l'attuale quota di veicoli diesel circolanti nell'area romana sino a EURO 4 e per qualsiasi classe EURO (dati ACI 2017). Le percentuali corrispondono dunque a dei valori di soglia di numerosità di veicoli che potrebbero potenzialmente essere interessati in uno scenario futuro a politiche di limitazione degli accessi. Nel modello tali limitazioni sono state simulate attraverso la variazione dei tempi privato (t_{OD}) per tutte le destinazioni interne alle aree di cordone precedentemente definite. In particolare tali tempi sono

stati posti pari al massimo valore registrato nei dati e relativi ai tempi privato (circa 4 ore). Ciò implica una limitazione e dunque può essere vista più come l'applicazione di una politica di *congestion charging* piuttosto che come una politica di blocco degli accessi.



Figura 19. Sovrapposizione delle aree identificate dal cordone C1 e dal cordone C2 (Scenario 2).

Tabella 8. Zone urbanistiche coinvolte dai due cordoni.

COD_Z_URB	ZONA	Cordone C1	Cordone C2
1a	Centro Storico	X	X
1b	Trastevere	X	X
1c	Aventino	X	X
1d	Testaccio	X	X
1e	Esquilino	X	X
1f	XX Settembre	X	X
1g	Celio	X	X
1x	Zona Archeologica	X	X
2a	Villaggio Olimpico	X	
2b	Parioli	X	
2c	Flaminio	X	
2d	Salario	X	
2e	Trieste	X	
2x	Villa Borghese	X	
2y	Villa Ada	X	
3a	Nomentano	X	
3b	San Lorenzo	X	
3x	Università	X	
16d	Gianicolense	X	X
16x	Villa Pamphili	X	X
17a	Prati	X	X
17b	Della Vittoria	X	X
17c	Eroi	X	X
18a	Aurelio Sud	X	X

Entrambi gli scenari sono stati simulati con riferimento alla fascia di punta mattutina, fascia in cui risulta più opportuno valutare l'efficacia di tali politiche in riferimento all'incremento della domanda di P&R.

A valle della simulazione dello scenario 1 il modello multimodale evidenzia differenti risultati in funzione delle condizioni al contorno:

1. si individuano zone dell'area di studio che, seppur soggette a forti miglioramenti dell'accessibilità a destinazione tramite trasporto collettivo, non registrano incrementi della quota iniziale di P&R (Figura 20): questo si verifica principalmente in quelle zone localizzate lungo il sistema portante (metro/ferro), che registrano già allo stato attuale quote significative di P&R (in media 3,9% di quota di P&R allo stato attuale, con punte del 10%). Per esse sembra dunque esaurita la capacità potenziale del sistema;
2. si individuano zone che registrano un incremento della quota di P&R solo se si raggiunge un livello di soglia significativo nella variazione dell'accessibilità a destinazione tramite trasporto collettivo. Queste sono sempre zone limitrofe al sistema portante (metro/ferro), ma dove esiste ancora una minima capacità potenziale del sistema attuale dei parcheggi (Figura 21). Alcune di esse corrispondono alle zone del punto 1., ma in intervalli temporali differenti, ovvero in intervalli temporali in cui ci sia ancora margine di capacità residua;
3. Per quanto attiene gli incrementi di quote di P&R che possono registrarsi in tale scenario, si può arrivare sino ad un massimo di +5 punti percentuali di incremento rispetto allo stato attuale, per un miglioramento dell'accessibilità del trasporto collettivo di circa 19 minuti. Tolate le zone per cui non vi è alcuna variazione della quota di P&R, l'incremento può variare in media da +0,19 a +1,23 punti percentuali, corrispondenti ad un miglioramento dell'accessibilità del sistema di trasporto pubblico dai 2 ai 10 minuti.



Figura 20. Rappresentazione zone per cui non si verifica incremento di quota di P&R (Scenario 1).



Figura 21. Rappresentazione zone per cui si verifica incremento di quota di P&R solo dopo il raggiungimento di un valore di soglia in termini di miglioramento del trasporto collettivo (Scenario 1).

Per lo scenario 2, i principali risultati in termini di multi modalità sono:

1. le variazioni massime delle quote di P&R sono di poco maggiori a +1 punto percentuale nel caso di limitazione alla quota maggiore di veicoli; Dunque penalizzare la mobilità privata con blocchi alla circolazione non riesce a determinare crescite significative a favore della multi modalità privato-trasporto pubblico o per lo meno non confrontabili con quanto è invece possibile ottenere tramite il rafforzamento della rete del trasporto collettivo (ossia applicando lo Scenario 1);
2. le variazioni delle quote di P&R non cambiano in maniera significativa se si considera il cordone C2 piuttosto che il cordone C1 (Figura 22). In entrambi i casi ci si attesta su un valore medio dell'incremento di quota di P&R pari a +0,29 e +0,18 punti percentuali rispettivamente nel caso di limitazione del 41% e del 24% dei veicoli; questo implica che da un punto di vista strategico e di equità sociale, l'amministrazione pubblica dovrebbe tendere a tale politica limitandosi all'area identificata dal cordone minore C1.

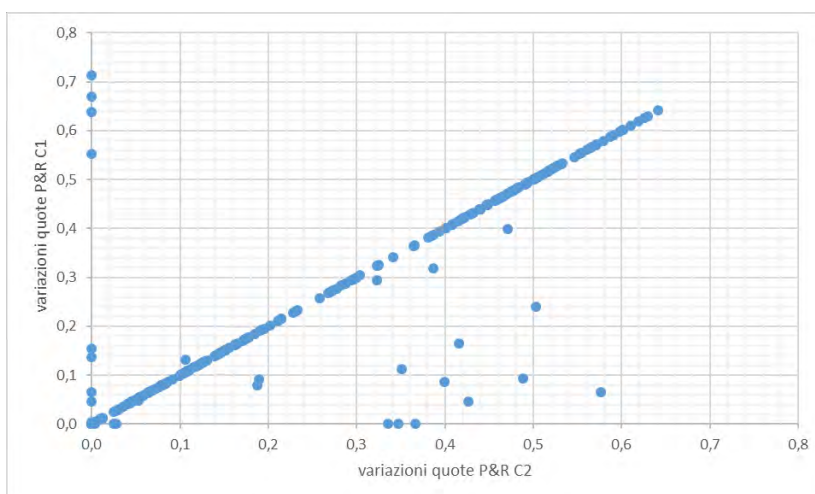


Figura 22. Confronto delle variazioni di quota di P&R ottenute nel caso di applicazione di C1 o C2 (Scenario 2).

Dai risultati dei suddetti scenari emerge la maggiore efficacia di una politica di tipo *pull* (Scenario 1) rispetto ad una politica di tipo *push* (Scenario 2) in relazione ad interventi atti a favorire la multi modalità. Ovviamente i suddetti risultati devono essere letti ricordando che, sia nel caso di miglioramento del sistema del trasporto collettivo (Scenario 1), che nel caso della limitazione degli ingressi (Scenario 2), il modello multi modale lavora per la stima della sola variazione di quota modale in termini di P&R. Ciò vuol dire che non è detto che a tali scenari non possano corrispondere altre variazioni modali, non stimate dall'attuale modello, quali variazioni verso il tutto pubblico o verso modalità più complesse (ad esempio: ride sharing o car sharing, singoli o in multi modalità con il trasporto collettivo).

2.3.1 Integrazione del modello multi modale nel simulatore

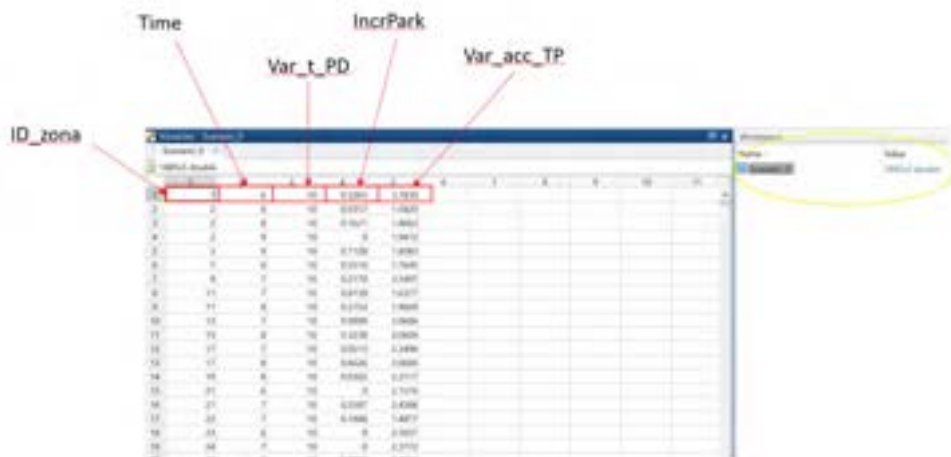
Il modello multimodale è stato integrato con il modello ad agenti sviluppato dal Dipartimento di Fisica (DF) dell'Università di Roma "La Sapienza" all'interno di uno strumento di simulazione in grado di rappresentare su mappa i risultati dei differenti scenari simulati [7].

L'integrazione tra le due strutture modellistiche prevede che il modello multimodale generi, esternamente al modello ad agenti ed in funzione dello scenario selezionato, le variazioni potenziali di quota di domanda di P&R nelle zone dell'area di studio. A queste variazioni segue una redistribuzione delle destinazioni finali degli spostamenti ed una ridefinizione delle attrazioni delle singole zone.

L'output del modello multi modale diviene quindi input per il modello ad agenti, in quanto va a modificare la domanda di spostamento tra le singole zone dell'area di studio. A valle della ridefinizione della domanda è possibile simulare tramite il modello ad agenti i *pattern* di mobilità sulla rete privata.

Per l'integrazione sono stati definiti due strutture dati in matlab che riportano i risultati degli scenari riportati nel paragrafo 2.3. In particolare, per lo scenario 1, tale struttura dati riporta le seguenti informazioni (Figura 23):

- ID di zona (ID_zona) e intervallo orario considerato (Time);
- riduzione [%] applicata rispetto allo stato attuale ai tempi su trasporto collettivo dai parcheggi di scambio a destinazione (Var_t_PD);
- variazione in punti % degli spostamenti generati dalla zona che utilizzano i parcheggi di scambio (campo IncrPark);
- Variazione temporale media [min] dell'accessibilità tramite P&R degli spostamenti in partenza da quelle zone (campo Var_acc_TP).



ID_zona	Time	Var_t_PD	IncrPark	Var_acc_TP
1	7	0	0	0
2	7	0	0	0
3	7	0	0	0
4	7	0	0	0
5	7	0	0	0
6	7	0	0	0
7	7	0	0	0
8	7	0	0	0
9	7	0	0	0
10	7	0	0	0
11	7	0	0	0
12	7	0	0	0
13	7	0	0	0
14	7	0	0	0
15	7	0	0	0
16	7	0	0	0
17	7	0	0	0
18	7	0	0	0
19	7	0	0	0
20	7	0	0	0
21	7	0	0	0
22	7	0	0	0
23	7	0	0	0
24	7	0	0	0
25	7	0	0	0
26	7	0	0	0
27	7	0	0	0
28	7	0	0	0
29	7	0	0	0
30	7	0	0	0
31	7	0	0	0
32	7	0	0	0
33	7	0	0	0
34	7	0	0	0
35	7	0	0	0
36	7	0	0	0
37	7	0	0	0
38	7	0	0	0
39	7	0	0	0
40	7	0	0	0
41	7	0	0	0
42	7	0	0	0
43	7	0	0	0
44	7	0	0	0
45	7	0	0	0
46	7	0	0	0
47	7	0	0	0
48	7	0	0	0
49	7	0	0	0
50	7	0	0	0
51	7	0	0	0
52	7	0	0	0
53	7	0	0	0
54	7	0	0	0
55	7	0	0	0
56	7	0	0	0
57	7	0	0	0
58	7	0	0	0
59	7	0	0	0
60	7	0	0	0
61	7	0	0	0
62	7	0	0	0
63	7	0	0	0
64	7	0	0	0
65	7	0	0	0
66	7	0	0	0
67	7	0	0	0
68	7	0	0	0
69	7	0	0	0
70	7	0	0	0
71	7	0	0	0
72	7	0	0	0
73	7	0	0	0
74	7	0	0	0
75	7	0	0	0
76	7	0	0	0
77	7	0	0	0
78	7	0	0	0
79	7	0	0	0
80	7	0	0	0
81	7	0	0	0
82	7	0	0	0
83	7	0	0	0
84	7	0	0	0
85	7	0	0	0
86	7	0	0	0
87	7	0	0	0
88	7	0	0	0
89	7	0	0	0
90	7	0	0	0
91	7	0	0	0
92	7	0	0	0
93	7	0	0	0
94	7	0	0	0
95	7	0	0	0
96	7	0	0	0
97	7	0	0	0
98	7	0	0	0
99	7	0	0	0
100	7	0	0	0

Figura 23. Struttura dati di alimentazione del simulatore (Scenario 1).

Per lo scenario 2 (Figura 24):

- ID di zona (ID_zona) e intervallo orario considerato (Time);
- Variazione in punti % degli spostamenti generati dalla zona che utilizzeranno i parcheggi di scambio (campo IncrPark_DE4_C2) a valle dell’inserimento della limitazione all’accesso per il 24% dei veicoli, cordone C2;
- Variazione in punti % degli spostamenti generati dalla zona che utilizzeranno i parcheggi di scambio (campo IncrPark_DE4_C1) a valle dell’inserimento della limitazione all’accesso per il 24% dei veicoli, cordone C1;
- Variazione in punti % degli spostamenti generati dalla zona che utilizzeranno i parcheggi di scambio (campo IncrPark_D_C2) a valle dell’inserimento della limitazione all’accesso per il 41% dei veicoli, cordone C2;
- Variazione in punti % degli spostamenti generati dalla zona che utilizzeranno i parcheggi di scambio (campo IncrPark_D_C1) a valle dell’inserimento della limitazione all’accesso per il 41% dei veicoli, cordone C1;

Nel simulatore è possibile selezionare lo scenario da simulare (Figura 25), ovvero se lo scenario 1 relativo al miglioramento della rete di trasporto pubblico o lo scenario 2 relativo alla limitazione degli accessi, nonché selezionare l’orario di simulazione in “Select Hours” Figura 26 (tra le ore appartenenti alla fascia di punta mattutina per cui sono stati valutati i risultati degli scenari, ovvero 6:00, 7:00, 8:00, 9:00).

ID_zona	Time	IncrPark_DE4_C2	IncrPark_DE4_C1	IncrPark_D_C2	IncrPark_D_C1
1	6:00	24	24	41	41
1	7:00	24	24	41	41
1	8:00	24	24	41	41
1	9:00	24	24	41	41
2	6:00	24	24	41	41
2	7:00	24	24	41	41
2	8:00	24	24	41	41
2	9:00	24	24	41	41

Figura 24. Struttura dati di alimentazione del simulatore (Scenario 2).

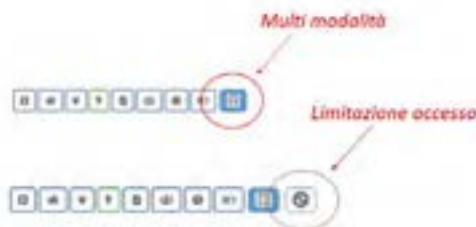


Figura 25. Button click per la selezione dello scenario 1 (Multi modalità) o dello scenario 2 (Limitazione accesso).

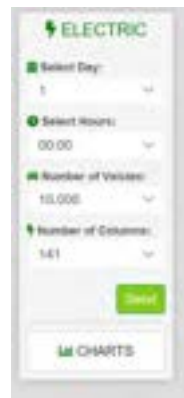


Figura 26. Finestra per la selezione dell'ora di simulazione.

Infine per lo scenario 1 è possibile selezionare attraverso una barra graduata il miglioramento complessivo che si vuole apportare delle prestazioni del sistema di trasporto collettivo, mentre per lo scenario 2 l'area di cordone di interesse (se C1 o C2) e la quota di veicoli soggetti alla limitazione all'accesso (se 24% o 41%).

Per poter integrare i due modelli è stato infine necessario effettuare un *matching* tra le zonizzazioni utilizzate. Di fatti, il modello ad agenti utilizza una zonizzazione geometrica (a celle esagonali, Figura 27) più fitta della zonizzazione urbanistica utilizzata dal modello multimodale. Per poter leggere i risultati a livello di singola cella, il risultato di ogni zona urbanistica è stato quindi rapportato alle singole celle che la compongono. Laddove la cella risulta parzialmente coperta, ad esempio lungo la linea di confine della singola zona urbanistica, il risultato è stato scalato per l'area effettiva coperta.

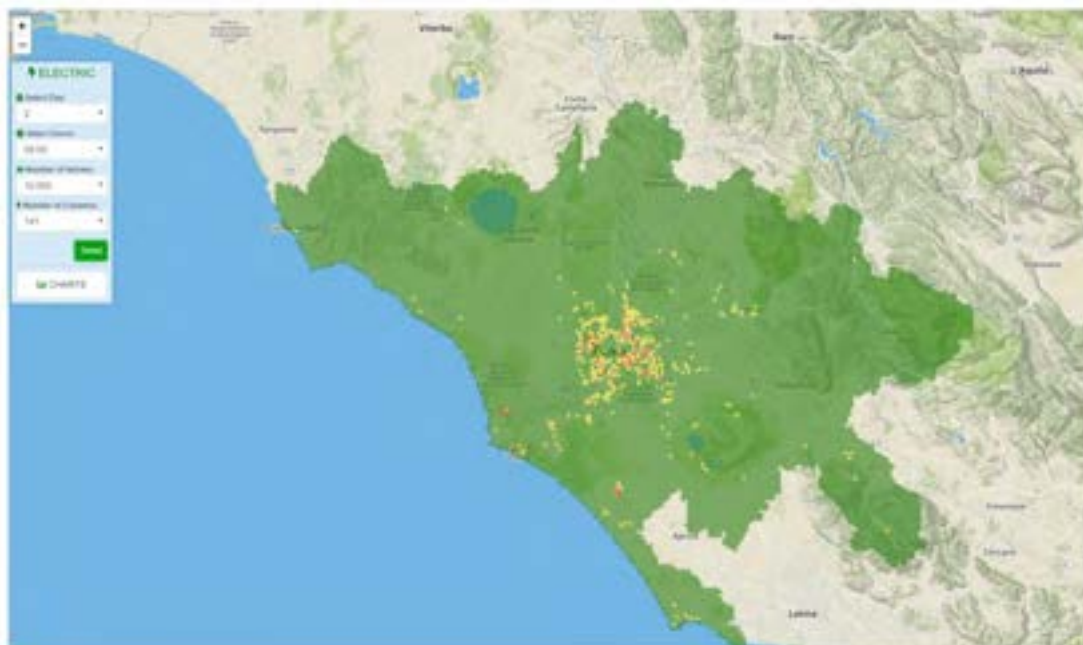


Figura 27. Zonizzazione esagonale utilizzata nel simulatore.

3 Conclusioni

Il presente documento riporta le attività condotte dal Dipartimento di Ingegneria, Università Roma Tre, nel secondo anno (accordo PAR 2017) del progetto D.7 Mobilità elettrica sostenibile.

Tale annualità ha visto:

4. la specificazione finale, la validazione ed il test di un modello atto a rappresentare comportamenti di scelta multimodali da parte dei veicoli elettrici; tali comportamenti si traducono nello scambio tra modalità privata e rete del trasporto collettivo presso i parcheggi di Park & Ride (P&R), con riferimento ad un caso applicativo di elevate dimensioni ed elevata complessità (Roma);
5. l'introduzione nel modello suddetto di incentivi atti a favorire l'uso delle postazioni di ricarica presso i parcheggi di P&R da parte dei veicoli elettrici ed una stima economica dell'importo di tali incentivi nello specifico caso di studio;
6. l'integrazione del suddetto modello all'interno di un simulatore in grado di rappresentare i *pattern* di mobilità sulla rete ed i comportamenti di ricarica, nonché la successiva simulazione di politiche trasportistiche volte alla multi modalità per la riduzione delle condizioni di congestione da traffico veicolare, la redistribuzione della domanda di energia, il contenimento dei picchi e la stabilizzazione della rete.

Il modello multimodale si configura come un modello di natura aggregata calibrato e validato secondo un approccio *data driven* basato su tecniche di *Machine Learning* ed in particolare sulla tecnica *Random Forest* (RF): esso calcola la quota di domanda di P&R emessa da ciascuna zona dell'area di studio, per ogni intervallo temporale nell'arco di una giornata feriale media, in funzione del livello di servizio fornito dall'offerta di trasporto, dell'interazione tra domanda di spostamento ed offerta stessa, delle caratteristiche territoriali ed insediative dell'area di studio.

Rispetto alla prima versione del modello, così come derivata per l'annualità 2016 (PAR2016), nella seconda annualità è stata calibrata e validata una seconda struttura, alimentando il processo attraverso fonti di dati aggiuntive, quali dati da assegnazione su modello di rete e dati da matrici di domanda trasportistiche. In tale modo è stato possibile: 1) implementare variabili descrittive aggiuntive contenenti i tempi sulla rete di trasporto pubblico. Queste ultime erano rimaste escluse dal precedente processo di calibrazione a causa della mancata presenza negli *open data* dei tempi su trasporto pubblico da/verso le connessioni con l'esterno del Comune di Roma; 2) calcolare in maniera più efficace le variabili esplicative dell'accessibilità del sistema di trasporto collettivo. Ne è risultato un modello ibrido dove l'approccio *data driven* si basa in parte su dati reali (*Floating Car Data* da banca dati OctoTelematics maggio 2013, *open data* trasporto pubblico Comune di Roma) ed in parte su dati simulati o da modello.

Il modello è stato oggetto di numerosi test per valutare la combinazione ottimale dei parametri che regolano il processo di apprendimento della *Random Forest*. Ne risulta un modello finale che vede un cospicuo miglioramento della rappresentazione del fenomeno, rispetto al modello calibrato nel corso della prima annualità, con una riduzione degli indicatori statistici misuranti lo scarto tra dati osservati e simulati anche superiore al 50% (l'errore quadratico medio passa di fatti da 0,74 del modello calibrato nella prima annualità a 0,29 del modello calibrato nella seconda annualità).

Ulteriori test sono stati condotti per valutare la sensitività del modello alle variabili indipendenti ed in particolare al riempimento dei parcheggi, che risulta essere la variabile con peso maggiore nella rappresentazione del fenomeno multimodale, assieme all'accessibilità garantita dal sistema di trasporto.

Al modello RF precedentemente calibrato e validato è stata affiancata e proposta una metodologia per l'introduzione di incentivi atti a favorire l'uso delle postazioni di ricarica presso i parcheggi di scambio da parte dei veicoli elettrici, andando dunque ad incrementare l'attrattività dei parcheggi stessi e dello scambio

verso il sistema di trasporto collettivo. Tali incentivi possono derivare da eventuali sconti sul costo dell'abbonamento al sistema di trasporto collettivo, così come ad eventuali sconti sulla bolletta elettrica. In quest'ultimo caso si ipotizza che i veicoli elettrici fermi nei parcheggi possano cedere parte della loro energia alla rete (schemi di *Vehicle To Grid*). Ciò deve ovviamente configurarsi in un pagamento di tale energia ceduta, o alternativamente in uno sconto sulla bolletta elettrica.

Nel modello RF, le suddette politiche possono essere incorporate introducendo una funzione aggiuntiva che lega la domanda di P&R con l'incentivo economico. Una stima dei possibili sconti sulla bolletta elettrica sono stati computati nella seconda annualità del progetto sotto l'ipotesi di ricarica completa dei veicoli nella fascia oraria notturna e considerando una soglia di sicurezza che consenta di non lasciare il veicolo completamente scarico a valle del processo di *Vehicle To Grid*. Sotto tali ipotesi e facendo riferimento al prezzo unitario dell'energia relativo al sistema di "scambio sul posto" adottato nel caso dei pannelli fotovoltaici (Articolo 6, DL 387/03, [4]), la stima del possibile sconto in bolletta ammonta a circa 500€/anno nel caso romano.

Il modello multimodale è stato infine integrato con il modello ad agenti sviluppato dal Dipartimento di Fisica (DF) dell'Università di Roma "La Sapienza" all'interno di uno strumento di simulazione in grado di rappresentare su mappa i risultati a valle della definizione di opportuni scenari trasportistici. L'integrazione tra le due strutture modellistiche prevede che il modello multimodale generi, esternamente al modello ad agenti ed in funzione dello scenario selezionato, le variazioni potenziali di quota di domanda di P&R nelle zone dell'area di studio. A queste variazioni segue una redistribuzione delle destinazioni finali degli spostamenti ed una ridefinizione delle attrazioni delle singole zone. Il modello ad agenti riceve la redistribuzione di tali attrazioni e ne simula i conseguenti *pattern* di mobilità. In particolare sono stati simulati due scenari di politiche trasportistiche:

3. Scenario 1: incentivazione e miglioramento della rete del trasporto collettivo al fine di incrementarne l'utilizzo dei servizi in termini di P&R; per tale scenario sono state simulate differenti azioni, che si ripercuotono in un miglioramento incrementale dei tempi sulla rete portante;
4. Scenario 2: politiche di limitazione degli ingressi. In particolare si simula la limitazione all'ingresso per diverse quote di veicoli verso due aree centrali della città, definite attraverso due alternative di cordone. Tali cordoni derivano dai confini identificati dall'Agenzia della Mobilità del Comune di Roma per la possibile applicazione di politiche di *congestion pricing* ed identificano una prima area relativa al centro storico (estensione: 22 km²) ed una seconda area (40 km²) delimitata che ingloba la precedente e si estende sino all'anello ferroviario.

I risultati di suddetti scenari hanno permesso di valutare e quantificare la capacità residua del sistema di trasporto collettivo in relazione alla scelta modale che prevede lo scambio presso i parcheggi di P&R, nonché la maggiore efficacia di una politica di tipo *pull* (Scenario 1) rispetto ad una politica di tipo *push* (Scenario 2) in relazione ad interventi atti a favorire la multi modalità.

Possibili sviluppi della ricerca in tale ambito possono ricercarsi nelle politiche di incentivazione allo scambio multi modale privato-trasporto collettivo per i veicoli elettrici così come nell'inserimento di ulteriori modalità elettriche all'interno del processo di simulazione quali il car sharing ed il ride sharing elettrico.

Nel primo caso si fa riferimento ad un futuro approfondimento della ricerca al fine di valutare la disponibilità dei *drivers* ad accettare ed a partecipare ad una politica di *Vehicle To Grid*, nonché l'elasticità della domanda di P&R all'incremento dell'incentivo economico. In entrambi i casi, si suggerisce un approccio che coinvolga il reperimento di dati comportamentali tramite indagini di tipo *Stated Preferences* (SP), trovandosi di fronte a scenari futuri per i quali non è possibile ottenere preferenze rilevate.

Nel secondo caso, il fine è quello di migliorare la rappresentatività della flotta veicolare elettrica simulata e poter valutare soluzioni multimodali complesse, così che il simulatore possa inglobare al suo interno ulteriori scenari e politiche.

4 Riferimenti bibliografici

1. M. Nigro, M. Ferrara, “Modelli di scelta multi-modale per scenari di elettrificazione della mobilità”, 2017, Report Ricerca di Sistema Elettrico, PAR2016
2. M. Nigro, S. Peruzzi, C. Liberto, C. Valenti, “Urban-scale macroscopic fundamental diagram: an application to the real case study of Rome”, 2017, Advances in Transportation Studies an international Journal Section B 42
3. C. Liberto, G.Valenti, S. Orchi, M. Lelli, M. Nigro , M. Ferrara, “The Impact of Electric Mobility Scenarios in Large Urban Areas: The Rome Case Study”, 2018, IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, Article in press
4. Articolo 6, LD n. 387/03. <http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2004/01/31/004G0041/sg>. Last access: 10th of April 2018.
5. E. Cipriani, L. Mannini, B. Montemarani, M. Nigro, M. Petrelli, “Congestion Pricing Policies: Design and Assessment for the city of Rome, Italy”, 2018, Case studies on Transport Policy, Article in press
6. M. Ferrara, C. Liberto, M. Nigro , M. Trojani, G. Valenti, “Multimodal choice model for e-mobility scenarios”, 21st EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2018, 17-19 September 2018, Braunschweig, Germany
7. I. Biazzo, M. Ferrara, C. Liberto, B. Monechi, M. Nigro, G. Valenti, “A Simulation Tool for Energy Management of E-Mobility in Urban Areas”, Submitted for MT-ITS conference 2019
8. Speidel, S., and T. Bräunl. Driving and charging patterns of electric vehicles for energy usage. Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 40, 2014, pp. 97-110.
9. Morrissey, P., P. Weldon, and M. O’Mahony. Future standard and fast charging infrastructure planning: An analysis of electric vehicle charging behaviour. Energy Policy, Vol. 89, 2016, pp. 257-270.
10. Autorità per l’energia elettrica, il gas e il sistema idrico, “Testo unico ricognitivo della produzione elettrica”, 2 agosto 2018. <https://www.autorita.energia.it/allegati/elettricita/TUP.pdf>

5 Abbreviazioni ed acronimi

FCD: Floating Car Data

RF: Random Forest

P&R: Park & Ride

OD: Origine-Destinazione

OP: Origine-Parcheggio

PD: Parcheggio-Destinazione

TP: Trasporto Pubblico

RMSE: Root Mean Square Error

MSE: Mean Square Error

MAE: Mean Absolute Error

MAPE: Mean Absolute Percentage Error

R²: coefficiente di determinazione

GME: Gestore dei Mercati Energetici

SP: Stated Preferences

6 Appendice: curriculum scientifico del gruppo di lavoro

CV Marialisa Nigro

Marialisa Nigro è nata a Roma il 7 marzo 1981. Nel 2004 si è laureata in Ingegneria Civile, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi "Roma Tre", con il massimo dei voti, discutendo una tesi dal titolo "Sistemi di trasporto non convenzionali: campi applicativi e analisi di fattibilità – una applicazione a Roma Tre". Nel 2009 ha conseguito il titolo di Dottore di ricerca in Scienze dell'Ingegneria Civile presso il Dipartimento di Scienze dell'Ingegneria Civile dell'Università degli Studi Roma Tre con una tesi dal titolo "Correzione della domanda di trasporto in dinamica intraperiodale con l'ausilio di differenti fonti di dati".

Da dicembre 2010 è ricercatrice universitaria presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "Roma Tre", dove è docente titolare dei corsi di "Pianificazione dei Trasporti" e "Trasporto merci e logistica". Dal 2017 è membro del consiglio direttivo della Società Italiana Docenti Trasporti (SIDT).

Le principali attività di ricerca riguardano: calibrazione e validazione di modelli di domanda, correzione della domanda di trasporto, modelli di assegnazione dinamica, interazione trasporti-territorio, modelli di stima delle emissioni in ambito urbano, mobilità elettrica.

Ha partecipato a numerose ricerche nel campo dei trasporti sia a livello nazionale che internazionale quali:

1. Attività di ricerca "Modelli di scelta multi-modale per scenari di elettrificazione della mobilità". Progetto D.7 "Mobilità elettrica sostenibile". Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2016. Accordo di Programma Ministero Sviluppo Economico-ENEA 2015-2017;
2. SAFER-LC "Safer Level Crossing by integrating and optimizing road-rail infrastructure management and design". Horizon 2020 research and innovation programme grant agreement. In corso;
3. Methods and tools for supporting the Use calibration and validation of Traffic simulation models – Multitude Project, European Union COST programme, 2011 - 2013;
4. BANDO CRUL - Progetto di Ricerca afferente alla filiera del Distretto Aerospazio: "Sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche per applicazioni innovative di controllo e gestione del traffico terrestre per una mobilità sostenibile", 2010 – 2015;
5. Cooperazione culturale e scientifica tra CIRRELT (Università di Montreal) e Dipartimento Scienze dell'Ingegneria Civile Università Roma Tre in relazione a temi di ricerca inerenti l'Ingegneria dei Trasporti (ICAR05), 2010 – 2014;
6. Sistema Integrato per la mobilità sostenibile: gestione del traffico urbano e monitoraggio dell'aria - SIMS (POR Puglia 2007-2013);
7. Fondo per gli investimenti sulla ricerca di base: "Sistema avanzato di tracciatura delle merci nei trasporti intermodali" dal 2008 al 2010;
8. Progetto di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale: "Valutazione Integrata e Monitoraggio nei Processi di sviluppo delle Grandi Aree Urbane Degradate" dal 2006 al 2007;
9. Fondo per gli investimenti sulla ricerca di base: "Interazione tra la regolazione semaforica ed i flussi di percorso su una rete stradale" dal 2005 al 2006;
10. Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale: "Sistemi di trasporto non convenzionali: campi applicativi e analisi di fattibilità" dal 2005 al 2006.

Svolge attività di revisione per conto di convegni internazionali e riviste, in particolare: EUROPEAN Transport Research Review e IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems.

Infine, è autrice di oltre 50 pubblicazioni su riviste e volumi di interesse nazionale ed internazionale.

CV Marina Ferrara

Marina Ferrara è nata a Roma il 30 agosto 1989. Nel 2016 ha conseguito la laurea magistrale in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie e Trasporti, presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "Roma Tre", discutendo una tesi dal titolo "Metodi per l'analisi di scenari di elettrificazione della mobilità privata e pubblica in grandi aree urbane".

Da ottobre 2017 è collaboratrice esterna presso l'Istituto Superiore di Formazione e Ricerca per i Trasporti (ISFORT) dove si occupa di studi di mobilità, progettazione del trasporto collettivo e modelli di domanda.

E' dottoranda di ricerca in Scienze dell'Ingegneria Civile presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi Roma Tre. Le principali attività di ricerca riguardano la calibrazione e validazione di modelli di domanda, la valutazione degli aspetti energetici ed ambientali del settore dei trasporti e la mobilità sostenibile.

Ha partecipato, oltre alle attività presenti in questo report, alle attività di ricerca relative a "Modelli di scelta multi-modale per scenari di elettrificazione della mobilità". Progetto D.7 "Mobilità elettrica sostenibile". Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2016. Accordo di Programma Ministero Sviluppo Economico-ENEA 2015-2017.

Infine, è autrice di alcune pubblicazioni su riviste e volumi di interesse nazionale ed internazionale su tematiche inerenti la mobilità elettrica.