



**Politecnico
di Torino**



Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare
A.a. 2021/2022
Sessione di Laurea marzo 2022

Analisi stocastica del contributo del Vehicle-to-Grid ai servizi di dispacciamento

Relatori:

Dr. Andrea Mazza
Prof. Ettore Francesco Bompard

Candidato:

Elena Delogu
Matricola 278881

Tutor Aziendale:

Ing. Paolo Tosco
Ing. Rémi Jacques Philibert Jaboeuf

Abstract

L'Unione Europea ha iniziato un processo di decarbonizzazione della produzione e del consumo di energia elettrica, incentivando la produzione di elettricità da fonte rinnovabile. L'aumento di tale quota di produzione porta però a squilibri nel sistema elettrico in virtù dell'intermittenza della risorsa stessa. Aumentano quindi i requisiti di riserva necessari per garantire la sicurezza operativa del sistema elettrico e la qualità del servizio di dispacciamento. In Italia, per rispondere a tale esigenza, il Mercato dei Servizi Ancillari è stato aperto alla domanda elettrica ed alle unità di produzione da fonti rinnovabili nonché ai sistemi di accumulo. Sono stati previsti da Terna dei progetti pilota, tra cui quello delle Unità Virtuali Abilitate Miste in cui rientrano anche i sistemi di accumulo funzionali alla mobilità elettrica. Così facendo si abilita la tecnologia vehicle-to-grid (V2G) al Mercato dei Servizi di Dispacciamento.

L'azienda italiana Edison intende acquisire know-how tecnico specifico da sfruttare non appena l'evoluzione normativa e regolatoria consentirà una completa integrazione tra le infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici e le reti. Un operatore di mercato come Edison potrà così far leva sulle sue competenze per gestire al meglio i punti di ricarica V2G.

In questo studio si usa un approccio statistico per simulare i meccanismi di mercato che permettono la partecipazione delle unità virtuali abilitate miste al mercato dei servizi di dispacciamento. Viene tenuto in conto anche l'impatto delle caratteristiche tecniche del veicolo e del comportamento degli utenti relativo ai loro bisogni di mobilità.

Sommario

Abstract	2
Indice delle Figure	1
Indice delle Tabelle.....	1
Lista delle abbreviazioni	2
1 Introduzione	4
1.1 Crisi climatica.....	4
1.2 Transizione energetica.....	6
1.3 Elettrificazione.....	8
1.4 Elettrificazione del settore trasporti	11
2 Il contesto italiano	12
2.1 Mercato veicoli elettrici (BEV)	12
2.2 Mercato Elettrico.....	17
2.2.1 Mercato dei servizi di dispacciamento	20
2.2.2 Riforme del MSD.....	22
2.3 Il ruolo di Edison come operatore V2X.....	25
3 Caso studio: modelli stocastici impiegati	25
3.1 Pendolarismo.....	26
3.2 Modelli di auto elettriche in circolazione	29
4 Caso studio: Risultati	32
4.1 Ipotesi	32
4.2 Modello matematico	33
4.3 Risultati: Confronto <i>Caso1</i> vs <i>Caso2</i>	34
4.4 Considerazioni	40
5 Conclusioni e sviluppi futuri	Errore. Il segnalibro non è definito.
6 Bibliografia.....	42

Indice delle Figure

Figura 1 Sintesi delle principali componenti della forzante radiativa del cambiamento climatico [3].	5
Figura 2 Approvvigionamento energetico totale mondiale per fonte nel 2019 [19]	6
Figura 3 Principali inquinanti per fonte [20].	7
Figura 4 The Duck Curve [28].	9
Figura 5 Risultati del World energy Trilemma Index del 2021 [22].	10
Figura 6 Consumo finale totale per settore [23]	11
Figura 7 Classificazione dei veicoli in base al tipo di alimentazione [24]	11
Figura 8 Nuove immatricolazioni in Italia per alimentazione	12
Figura 9 Numero immatricolazioni in Italia negli anni 2019, 2020, 2021.	13
Figura 10 Andamento delle immatricolazioni negli anni 2019 (a), 2020 (b), 2021 (c)	14
Figura 11 Circolazione auto elettriche per regione nel 2020	15
Figura 12 Circolazione auto elettriche per regione e densità di popolazione, nel 2020 [17].	16
Figura 13 Immatricolazioni veicoli per alimentazione e per proprietario [17].	17
Figura 14 Descrizione Campi del file ISTAT del pendolarismo.	26
Figura 15 Codice ISTAT Comune di Torino	26
Figura 16 Struttura matrice ISTAT delle distanze	27
Figura 17 Workflow di KNIME	27
Figura 18 Cumulata dei km percorsi nel tragitto casa-lavoro	28
Figura Cumulata dei principali BEV in circolazione negli anni 2019, 2020, 2021	30
Figura 20 Schema del modello matematico	34
Figura 21 Confronto Caso1 vs Caso2	35
Figura 22 Confronto Ricezione Corrispettivo Variabile	37
Figura 23 Probabilità di ricezione Corrispettivo Fisso	39
Figura 24 Risposta statistica ricezione Corrispettivo fisso mensile	40

Indice delle Tabelle

Tabella 1 Numero dei modelli di auto immatricolate negli anni 2019, 2020, 2021	29
Tabella 2 Caratteristiche tecniche dei modelli delle auto elettriche	31
Tabella 3 Elementi distintivi del confronto tra Caso1 e Caso2.	35
Tabella 4 Caratteristiche delle auto che forniscono servizio alla rete per vari time step	36
Tabella 5 25° percentile	37
Tabella 6 50° percentile	38
Tabella 7 75° percentile	38
Tabella 8 100° percentile	38
Tabella 9 Probabilità di ricezione del Corrispettivo fisso mensile	39

Lista delle abbreviazioni

ANFIA	Associazione Nazionale Filiera Industria Automobilistica
ARERA	Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente
AU	Acquirente Unico
BEV	Battery Electric Vehicle
BSP	Balance Service Provider
FER	Fonti di energia rinnovabili
GHG	Green House Gases
GME	Gestore dei Mercati Energetici
GSE	Gestore dei Sistemi Energetici
IPCC	International Panel on Climate Change
ISTAT	Istituto Nazionale di Statistica
MB	Mercato del Bilanciamento
ME	Mercato Elettrico
MI	Mercato Infragiornaliero
MISE	Ministero dello Sviluppo Economico
MGP	Mercato del Giorno Prima
MPE	Mercato Elettrico a Pronti
MPEG	Mercato dei Prodotti Giornalieri
MSD	Mercato dei Servizi di Dispacciamento
MTE	Mercato a Termine dell'Energia elettrica
PUN	Prezzo Unico Nazionale
RF	Radiative Forcing
SOC	State Of Charge
TIDE	Testo Integrato del Dispacciamento Elettrico
UC	Unità di Consumo
UdD	Utenti del Dispacciamento
UE	Unione Europea
UNRAE	Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri
UP	Unità di Produzione
UVAM	Unità Virtuali Abilitate Miste
V2G/G2V	Vehicle-to-Grid / Grid-to-Vehicle
WMO	World Meteorological Organization

1 Introduzione

1.1 Crisi climatica

Il clima è un sistema complesso costituito dall'interazione tra l'atmosfera, la superficie terrestre, la neve e i ghiacciai, gli oceani e gli specchi d'acqua in generale, e infine gli esseri viventi. Viene definito dalla World Meteorological Organization (WMO) come la "media delle condizioni ambientali (il tempo atmosferico) che persistono in un certo luogo geografico e per un periodo di tempo lungo, tipicamente nell'ordine dei 30 anni" [1]. È principalmente funzione dell'inclinazione dei raggi solari sulla superficie terrestre al variare della latitudine e, nonostante si verifichino delle variabilità climatiche inter-annuali dovute alle stagioni, presenta un andamento stabile nel medio-lungo periodo. Anche il sistema climatico, però, si evolve nel tempo grazie all'influenza di dinamiche interne e forzanti esterne. Queste ultime possono essere di origine naturale (come le eruzioni vulcaniche e le variazioni solari) o di origine antropica, e contribuiscono a cambiare la composizione dell'atmosfera.

Una visione globale della variabilità e dei cambiamenti a lungo termine nell'atmosfera, dell'oceano, della criosfera e della superficie terrestre è resa possibile sia da misure dirette e indirette dei satelliti, che da ricostruzioni paleoclimatiche che hanno permesso di estendere i dati fino a milioni di anni addietro.

Allo scopo di fornire una visione chiara e scientificamente fondata dello stato attuale delle conoscenze sui cambiamenti climatici e sui loro potenziali impatti ambientali e socioeconomici, nel 1988 è stato istituito l'Intergovernamental Panel on Climate Change (IPCC).

Nel quinto rapporto di valutazione [2] dell'IPCC, vengono presentati i seguenti fatti:

- I dati combinati della temperatura media globale di terra e oceano mostrano un aumento pari a $0,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ nel periodo 1880-2012.
- Il riscaldamento degli oceani è maggiore vicino alla superficie, e i primi 75 metri hanno sperimentato un aumento di temperatura di $0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ per decennio nel periodo 1971-2010.
- Il tasso medio di scioglimento di ghiaccio dalle calotte rispettivamente di Groenlandia e di Antartide è aumentato, passando da 34 Gt/anno nel periodo 1992-2001 a 215 Gt/anno nel periodo 2002-2011 per la Groenlandia e da 30 Gt/anno a 147 Gt/anno , per l'Antartide.
- Il tasso di innalzamento del livello del mare dalla metà del XIX secolo è stato maggiore rispetto al tasso medio dei 2000 anni precedenti e nel periodo 1901-2010 il livello globale medio del mare è cresciuto di $0,19\text{ m}$.
- Le concentrazioni atmosferiche dei gas serra anidride carbonica (CO_2), metano (CH_4) e protossido di azoto (N_2O), sono tutte aumentate dal 1750 per effetto delle attività antropiche; nel 2011 le concentrazioni di questi gas serra erano rispettivamente 391 ppm , 1803 ppb , e 324 ppb , e superavano i livelli preindustriali di circa il 40%, 150%, e 20%.

Dal report emerge che "è estremamente probabile che l'influenza umana sia stata la causa dominante del riscaldamento osservato sin dalla metà del XX secolo." [2].

Le attività umane contribuiscono al cambiamento climatico in quanto causano una variazione delle quantità o delle proprietà dei gas serra, degli aerosol e della nuvolosità presenti in atmosfera, che altera sia la quantità di radiazione solare incidente che quella infrarossa verso lo spazio. La capacità di tali fattori di modificare il bilancio energetico del sistema terra-atmosfera, che controlla la temperatura della superficie terrestre, è valutata in termini del loro forzante radiativo ed è tenuta in conto nell'indicatore Radiative Forcing (RF). In Figura 1 è mostrato il contributo al RF da parte di alcuni fattori derivanti dalle attività umane [3].

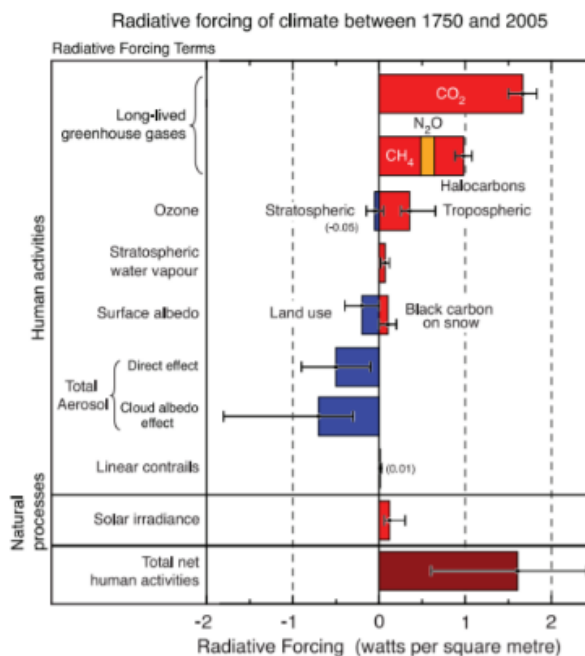


Figura 1 Sintesi delle principali componenti della forzante radiativa del cambiamento climatico [3].

Dall'inizio dell'era industriale (1750) si è visto che complessivamente le attività umane hanno portato a un riscaldamento del sistema clima. Si è anche visto che questo impatto ha un peso maggiore rispetto a cambiamenti dovuti a processi naturali quali i cambiamenti solari e le eruzioni vulcaniche. Le forzanti per i gas serra (GHG)¹ sono positive perché tali gas sono in grado di accumulare all'interno dell'atmosfera terrestre una parte dell'energia termica proveniente dal Sole e, tra i gas serra, il contributo maggiore è dovuto alle emissioni in atmosfera di anidride carbonica derivanti dalla combustione di combustibili fossili. L'RF totale antropogenico è attualmente pari a 2,29 W/m², valore positivo indicante riscaldamento della superficie terrestre e risulta del 43% maggiore del RF stimato per il 2005 [2].

Gli eventi legati al clima pongono già rischi per la società a causa degli impatti sulla salute, sulla sicurezza alimentare e idrica, nonché sulla sicurezza umana, sui mezzi di sussistenza, sull'economia, sulle infrastrutture e sulla biodiversità. Il cambiamento climatico ha implicazioni anche per i servizi ecosistemici. Può influenzare i modelli di utilizzo delle risorse naturali, nonché la distribuzione delle risorse tra le regioni e all'interno dei Paesi [4].

¹ I Greenhouse Gases, sono chiamati così perché sono responsabili dell'effetto serra, un fenomeno di regolazione della temperatura del Pianeta. Questi gas permettono l'ingresso della radiazione solare mentre ostacolano l'uscita della radiazione infrarossa riemessa dalla superficie terrestre.

1.2 Transizione energetica

Attualmente il sistema energetico è dominato dai combustibili fossili, come si può notare dalla Figura 2 il fabbisogno mondiale di energia primaria (TPES)² nell'anno 2019 è coperto per il 26,8% da carbone, per il 30,9% da petrolio e per il 23,2% da gas naturale

La transizione energetica dai combustibili fossili alle energie rinnovabili è uno strumento chiave per contrastare il cambiamento climatico antropogenico che, in assenza di azioni decise, mette a rischio la sopravvivenza stessa della nostra civiltà [5].

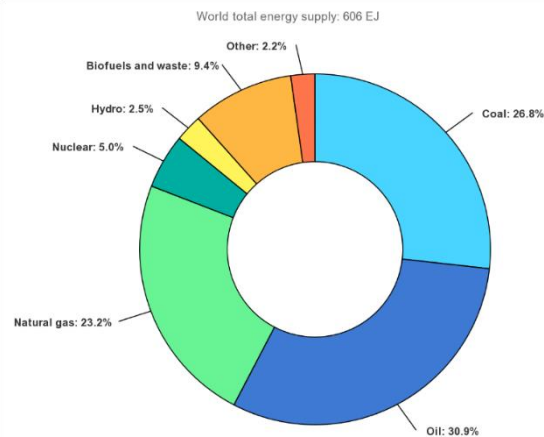


Figura 2 Approvvigionamento energetico totale mondiale per fonte nel 2019 [19]

Per soddisfare le necessità primarie, la civiltà ha da sempre cercato e utilizzato diverse fonti di energia. La naturale diversificazione di tali risorse è dovuta a diversi fattori come la loro scarsità, la convenienza economica, l'inquinamento, l'innovazione tecnologica e l'efficienza energetica. Nel corso della storia, la biomassa ha avuto un ruolo da protagonista grazie alla sua abbondanza e semplicità di utilizzo. La più grande transizione energetica, che ha visto il passaggio dalla biomassa legnosa ai combustibili fossili (carbone), è iniziata durante la Rivoluzione Industriale del 1700 nel Regno Unito, Europa e Nord America, per poi ultimarsi due secoli più tardi. Successivamente, nel 1973 i paesi arabi membri dell'OPEC hanno attuato un embargo delle spedizioni di petrolio nei confronti dei paesi occidentali, oltre ad un rincaro del 100% del prezzo del greggio dando origine a una crisi energetica. Questa ha innescato la necessità di una transizione dei sistemi energetici, portando alla ricerca di nuove fonti di approvvigionamento alternative al petrolio come il gas naturale e l'energia nucleare, anche per ridurre la dipendenza energetica dai paesi detentori dell'oro nero. Tra le risposte più significative a tale crisi energetica sono da evidenziare quelle del Brasile e della Francia. Il Brasile è passato dall'importare l'80% del suo fabbisogno di petrolio ad essere il più grande esportatore di bio-etanolo, grazie all'azione di politiche governative volte a supportare i produttori locali di zucchero e rafforzare il settore produttivo delle auto. La Francia, che affidava all'importazione del petrolio il 70% del suo TPES, in tre decenni è riuscita a produrre energia elettrica da nucleare, grazie al supporto finanziario del governo.

Questi due esempi passati hanno dimostrato che la transizione tra fonti energetiche è possibile nell'arco di pochi decenni, se il governo la riconosce come priorità. Secondo Barry. D. Solomon una transizione su scala globale in meno di tre decenni è invece estremamente improbabile, perfino in presenza del consenso a livello internazionale, per esempio per combattere il cambiamento climatico. Un'opportunità più rapida consiste nella diffusione di tecnologie ad alta efficienza energetica, che sono economicamente vantaggiose, più semplici da implementare, già esistenti e non richiedono innovazioni tecnologiche. [6]

² Total Primary Energy Supply. È definito come la produzione di energia più gli import meno gli export, meno il trasporto marittimo e aereo, più o meno le variazioni di stock.

L'Unione Europea (UE) sta portando avanti una serie di politiche volte a contrastare la crisi climatica. Nel 2015, ha firmato l'Accordo di Parigi sul clima, il quale stabilisce come obiettivo a lungo termine al 2030, quello di contenere l'aumento della temperatura ben al di sotto dei 2°C, preferibilmente 1.5°C, rispetto ai livelli preindustriali. L'adesione dell'UE a tale trattato si colloca nel contesto del Green Deal europeo, il cui obiettivo fondamentale è quello di rendere sostenibile l'economia per garantire la sicurezza e la stabilità degli Stati membri, promuovendo un uso efficiente delle risorse. Allo scopo di raggiungere questi risultati, l'UE ha adottato una serie di pacchetti legislativi in materia ambientale. Tra questi, vi è quello che riguarda il settore trasporti.

Il sistema dei trasporti è fondamentale per le imprese europee e contribuisce per circa il 5% al PIL³ dell'UE. Allo stesso tempo però, i trasporti non sono privi di costi per la nostra società, per via delle emissioni di GHG e di sostanze inquinanti, rumore, incidenti stradali e congestione del traffico.

Nella Figura 3, dove vengono riportati i principali inquinanti e le loro fonti, si nota come il settore dei trasporti sia direttamente responsabile di gran parte delle emissioni di ossidi di azoto, di circa un terzo delle emissioni di monossido di carbonio, ma anche di una quota delle emissioni di diossido di zolfo, PM2,5 e composti organici volatili.

Figure 1.3 ▶ Selected primary air pollutants and their sources, 2015

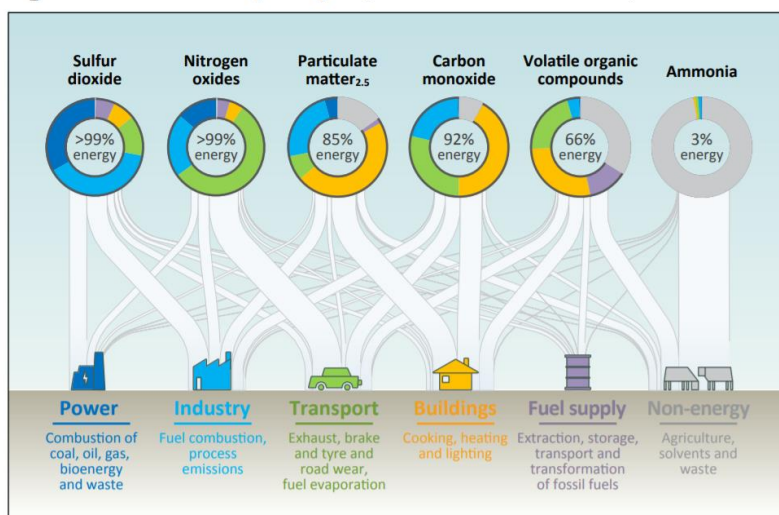


Figura 3 Principali inquinanti per fonte [20]

Il regolamento (UE) 2019/631 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 17 aprile 2019 [7], definisce i livelli di prestazione in materia di emissioni di CO₂ delle autovetture nuove e dei veicoli commerciali leggeri nuovi, applicate a partire dal 2020, 2025 e 2030 e include un meccanismo per incentivare la diffusione di veicoli a basse e a zero emissioni. Dal momento dell'entrata in vigore nel 2020, le emissioni medie di CO₂ delle nuove autovetture immatricolate in Europa sono diminuite del 12% rispetto all'anno precedente e la quota di auto elettriche è triplicata. Il testo contiene anche indicazioni circa l'introduzione di sanzioni per eccesso di emissioni rispetto al target. Se le emissioni medie di CO₂ del parco veicoli di un costruttore superano il suo obiettivo specifico di emissioni in un determinato anno, il costruttore deve pagare – per ciascuno dei suoi veicoli di nuova immatricolazione in quell'anno – una penale pari a 95 € per g/km di emissioni in eccesso rispetto al target.

³ Prodotto Interno Lordo

1.3 Elettificazione

L'elettificazione è il processo di sostituzione delle tecnologie basate sui combustibili fossili con quelle che usano l'elettricità come fonte di energia. Se l'elettricità è prodotta da fonti rinnovabili, allora l'elettificazione rappresenta un'opportunità per transire verso un sistema decentralizzato, decarbonizzato e digitale. Essa può realizzarsi in modo diretto, usando il vettore elettrico direttamente negli usi finali, oppure si può intraprendere la strada dell'elettificazione indiretta, grazie alla possibilità di produrre idrogeno "verde"⁴ e combustibili sintetici⁵.

Il potenziale di elettificazione varia notevolmente tra i settori degli usi finali. Mentre alcuni settori, come quello residenziale e dei trasporti, hanno già tecnologie pronte per il commercio, altri, come quello industriale, devono superare ostacoli sia tecnologici che economici per essere elettrificati.

In ogni caso, è necessario potenziare l'infrastruttura esistente, in virtù dell'aumento di energia elettrica che transita sulle linee.

Problemi causati al sistema elettrico

È chiaro che l'elettificazione degli usi finali ha senso solo se l'elettricità viene prodotta da fonti di energia rinnovabili (FER). Tuttavia, una produzione basata solo su queste comporta alcuni problemi tecnici. Le risorse rinnovabili non dispacciabili⁶, come l'eolico e il fotovoltaico, sono per loro natura imprevedibili e poco controllabili; perciò, la potenza da loro generata è discontinua. Questo ha un impatto negativo sulla qualità della potenza e della tensione dell'elettricità trasmessa nella rete.

La qualità della potenza dipende dalle variazioni di:

- frequenza di rete; nel caso degli impianti fotovoltaici la variazione della radiazione solare induce cambiamenti nella produzione di potenza attiva
- fattore di potenza, questo è una misura della differenza di fase tra corrente e tensione in un sistema in corrente alternata. Per quanto riguarda gli impianti fotovoltaici, questi non generano potenza reattiva quindi, quando la produzione è consistente, il fattore di potenza diminuisce e le perdite del sistema aumentano; nel caso di impianti eolici, il consumo di potenza reattiva, e quindi il fattore di potenza, dipende dalla tipologia di generatore eolico
- armoniche, definite come le deviazioni delle forme d'onda di tensione e corrente da quella sinusoidale.

La qualità della tensione è influenzata da:

- perdite di potenza che ad esempio sono dovute all'elettronica di potenza che interfaccia sia i pannelli fotovoltaici che le turbine eoliche con la rete
- verso del flusso di potenza, nelle situazioni in cui la produzione locale supera il consumo, questa viene reimpressa in rete, invertendo flusso di potenza (Reverse Power Flow) da bassa tensione ad alta tensione
- fluttuazioni di tensione che sono rappresentate dalle variazioni di tensione lungo la linea di distribuzione tra i punti di generazione e consumo
- sbilanciamenti della tensione tra la produzione e la domanda

⁴ L'idrogeno è definito "verde" quando il processo di elettrolisi utilizza energia rinnovabile.

⁵ Prodotti combinando la CO₂ e l'H₂ verde. Sono compatibili con i motori a combustione interna e le infrastrutture esistenti.

⁶ Gli impianti di generazione dispacciabile o programmabile sono quelli che possono essere accesi/spenti o regolati in potenza in base a una richiesta. Di contro si definiscono non dispacciabili quelli che non possono soddisfare queste richieste perché tale generazione è intermittente a causa di fattori che non possono essere controllati, come il tempo atmosferico.

Effetti sul parco di generazione convenzionale:

Uno degli effetti dell'aumento delle rinnovabili nella rete, a causa della "priorità di dispacciamento" di cui godono, è la riduzione del numero di "ore annue equivalenti" (energia specifica prodotta) di produzione da parte dei gruppi a gas (CCGT)⁷, che sono, quindi, soggetti a stress per via del funzionamento ad intermittenza e delle operazioni a carico ridotto, contrariamente allo scopo per cui sono stati progettati (mid-merit⁸ e base). Attualmente, i gruppi CCTG sono essenziali a fornire servizi ancillari alla rete per garantirne la stabilità fornendo riserva rapida, che viene invece a mancare con la penetrazione massiccia delle rinnovabili nella rete elettrica, caratterizzate da bassa inerzia.

Disaccoppiamento dei profili di generazione e consumo:

Nel caso della produzione rinnovabile da fotovoltaico, questa è concentrata nelle ore centrali della giornata, mentre il picco della domanda si ha la sera, dopo il tramonto del sole. Questa situazione è difficile da bilanciare. Infatti, come si può vedere dalla Figura 4, in cui viene mostrato lo sbilanciamento temporale tra il picco della domanda e la produzione da rinnovabile in California al 22 ottobre 2016, per soddisfare il carico netto, è richiesto un aumento molto rapido di generazione di potenza da risorse "dispacciabili", in breve tempo tra le 17 e le 18. Questo profilo è noto come "Duck Curve". Una strategia di mitigazione è quella di accoppiare la produzione fotovoltaica a un sistema di accumulo. Quest'ultimo consente di accumulare energia nei periodi di maggior produzione (evitando anche operazioni di *curtailment*⁹) e renderla disponibile nei momenti di maggior richiesta.

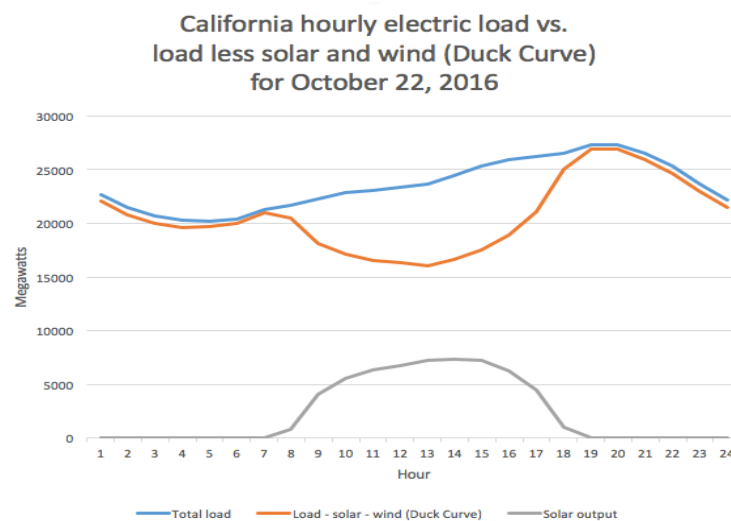


Figura 4 The Duck Curve [28]

Curva blu: domanda di elettricità.

Curva arancione: carico "netto" da soddisfare con risorse "dispacciabili"

Curva grigia: produzione di potenza da fotovoltaico

⁷ Combined Cycle Gas Turbine. Le turbine a gas a ciclo combinato consentono la generazione di energia con un'efficienza elevata grazie all'utilizzo di una turbina a gas e di una seconda turbina azionata dal vapore generato dal calore dei gas di scarico prodotti dalla turbina a gas.

⁸ I mid-merit sono una tipologia di impianti di produzione destinati alla modulazione del carico della rete, che quindi operano per un numero limitato di ore all'anno

⁹ Il curtailment è l'azione di riduzione della potenzialità produttiva per bilanciare la domanda e la produzione di energia elettrica, causa perdite economiche per i produttori di energia rinnovabile e perdita di produzione di energia "pulita".

Per avere un sistema energetico «sano» è necessario bilanciare gli aspetti di:

- Sicurezza energetica
- Uguaglianza energetica
- Sostenibilità ambientale

Che costituiscono il cosiddetto “energy trilemma”.

In Figura 5, viene mostrato lo stato del World Energy Trilemma Index del 2021, un indicatore che misura l’equilibrio tra le tre dimensioni del Trilemma, all’interno del sistema energetico mondiale, valutato sulla base di dati globali e nazionali riguardanti l’efficienza energetica di 128 Paesi.

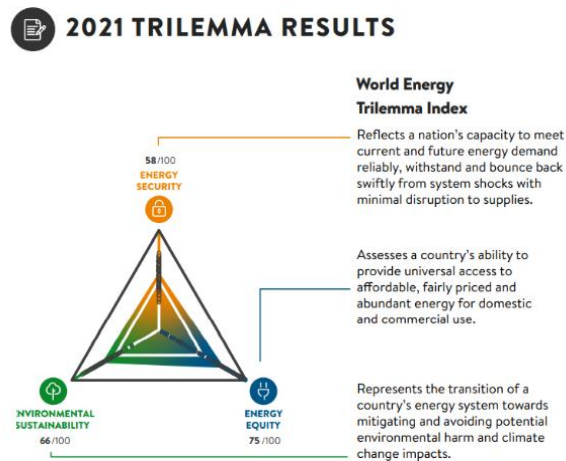


Figura 5 Risultati del World energy Trilemma Index del 2021 [22].

Quando l’indice è valutato per un singolo Paese, questo ha lo scopo di fornire informazioni sulla situazione dell’insieme di policy e di come lo Stato gestisce i tre elementi che compongono l’indicatore. Nello specifico, la Sicurezza Energetica rappresenta la capacità di un Paese di fronteggiare la domanda di energia presente e futura, minimizzando le interruzioni di servizio, la Sostenibilità Ambientale indica l’avanzamento della transizione del sistema energetico nazionale per mitigare ed evitare potenziali danni ambientali e gli impatti dovuti al cambiamento climatico. Infine, l’Uguaglianza Energetica definisce la capacità di fornire accesso universale ed economicamente sostenibile all’energia per uso domestico e commerciale.

1.4 Elettificazione del settore trasporti

Tra gli usi finali, insieme all'industria e al residenziale, il settore trasporti è uno dei più energivori, come si evince dalla Figura 6, motivo per cui quest'ultimo rappresenta terreno fertile per intraprendere azioni di decarbonizzazione.

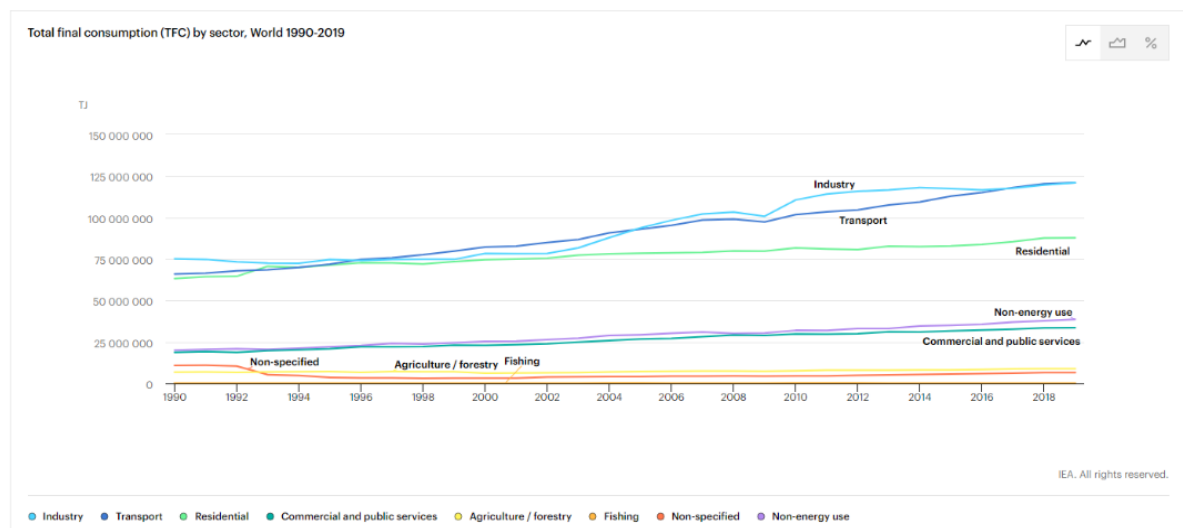


Figura 6 Consumo finale totale per settore [23]

Per quanto riguarda l'elettificazione del settore dei trasporti, ci si concentra sui veicoli leggeri destinati al trasporto di persone.

Una prima classificazione dei veicoli è quella basata sul tipo di alimentazione. Come mostrato in Figura 7, all'estrema sinistra ci sono i veicoli a combustione interna azionati da benzina o diesel, si passa poi ai i veicoli ibridi in cui, via via spostandoci verso destra, aumenta la quota di elettricità generata all'interno del veicolo. Si passa dall'avere componenti elettriche che azionano solo la funzioni di accensione del veicolo come nel Micro Hybrid, alla possibilità di avere la frenata rigenerativa con i Mild Hybrid, a veicoli completamente ibridi in cui il motore elettrico supporta quello termico e che possono funzionare anche solo in modalità elettrica. Si prosegue poi con i Plug-in Hybrid, con batteria che può essere ricaricata esternamente, e con i veicoli ibridi con Range Extender, in cui il motore termico produce elettricità per il motore elettrico ai fini di aumentarne l'autonomia. Infine, all'estrema destra dell'immagine, vengono presentati i veicoli completamente elettrici, ovvero i veicoli elettrici a batteria¹⁰ e i veicoli elettrici a cella a combustibile alimentata da idrogeno.

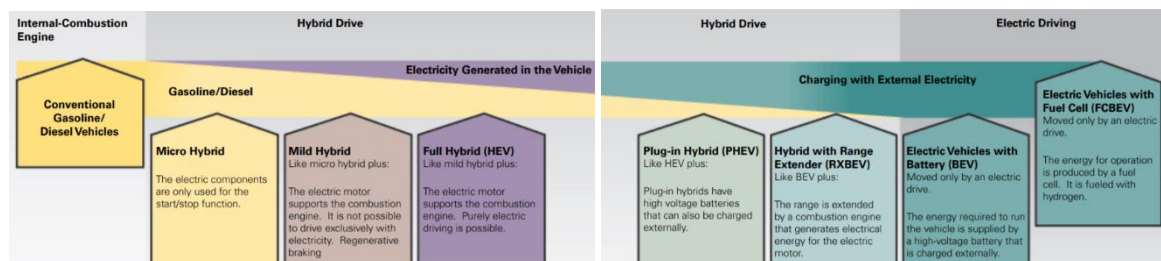


Figura 7 Classificazione dei veicoli in base al tipo di alimentazione [24]

¹⁰ BEV o PEV, a seconda che la batteria una volta scarica debba essere sostituita oppure che possa essere ricaricata dall'esterno con apposito connettore. D'ora in poi con BEV saranno indicati i veicoli elettrici plug-in.

2 Il contesto italiano

2.1 Mercato veicoli elettrici (BEV)

In Italia, come mostra la Figura 8, le immatricolazioni¹¹ di nuovi veicoli elettrici a batteria (BEV) sono passate da 147 unità nel 2001 a 10681 nel 2019 con un aumento relativo del 7166%. Si nota come la quota di veicoli elettrici rispetto al totale è irrisoria; infatti, le immatricolazioni delle auto a benzina sono state circa 1 milione nel 2019, il 34% in meno rispetto al 2001, il dato per le auto a diesel è pari a 789 000 circa nel 2019 e corrisponde all'11% in meno rispetto al 2001.

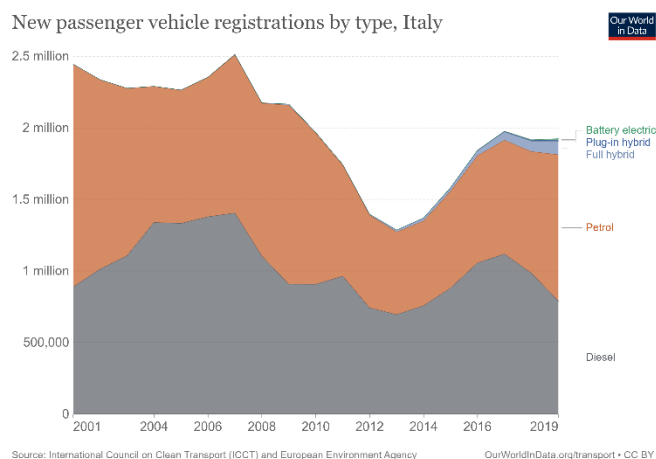


Figura 8 Nuove immatricolazioni in Italia per alimentazione

Allo scopo di avere una visione chiara sullo stato attuale della mobilità elettrica in Italia, è stata fatta un'analisi approfondita partendo dai dati dell'Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri (UNRAE), associazione delle case automobilistiche estere che operano in Italia nella distribuzione e commercializzazione di autovetture, veicoli commerciali e industriali, bus, rimorchi, eccetera. L'associazione fa parte dal 2013 del sistema statistico nazionale dell'ISTAT e contribuisce a fornire elementi, statistiche, valutazioni e scenari che siano di supporto agli Enti competenti della gestione della mobilità stradale. Sul sito dell'associazione si trovano delle classifiche mensili con modelli di autovetture e fuoristrada immatricolati in Italia, con il dettaglio per tipologia di alimentazione.

Con riferimento ai dati degli ultimi tre anni, è emerso, come si nota nella Figura 9, che il 2021 ha visto, rispetto al 2019, un aumento relativo del numero di veicoli elettrici immatricolati pari a +540% che rappresenta il

¹¹ L'immatricolazione, nell'ambito dei trasporti, è la procedura di base alla quale un veicolo viene riconosciuto idoneo alla circolazione stradale.

4,4% del totale dei veicoli immatricolati, contro lo 0,5% di share del 2019. Di contro si è assistito a una riduzione delle immatricolazioni totali che, nel 2021, hanno subito una diminuzione del 23% rispetto al 2019.

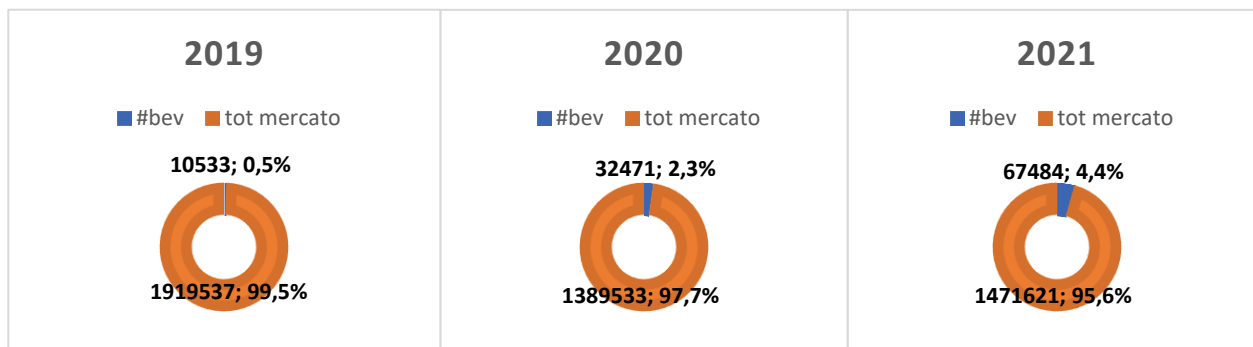


Figura 9 Numero immatricolazioni in Italia negli anni 2019, 2020, 2021

Per avere un dettaglio mensile dei trend delle immatricolazioni si rimanda alla Figura 10.

In generale, l'andamento da gennaio a dicembre è in diminuzione con una riduzione più marcata nel mese di agosto, mese che tradizionalmente registra i volumi più bassi. L'anno 2020 è stato invece un anno anomalo a causa della pandemia COVID-19 e, andando da inizio a fine anno, si è avuto un trend positivo, anche se caratterizzato da una drammatica riduzione delle immatricolazioni nel mese di marzo in concomitanza con l'entrata in vigore delle misure restrittive¹² che ha determinato la prolungata chiusura degli stabilimenti nei principali paesi produttori.

Da un'analisi settoriale effettuata da Cassa Depositi e Prestiti, EY e Luiss Business School nel 2020 [8], è emerso che tra i Paesi europei, l'Italia ha subito con maggiore intensità l'impatto della crisi. Il lockdown completo a partire dall'11 marzo ha determinato un crollo nelle vendite su base mensile superiore all'85%, che ha raggiunto quasi il 98% in aprile. In due mesi il mercato ha registrato un calo del 18% rispetto al totale delle auto vendute in tutto il 2019.

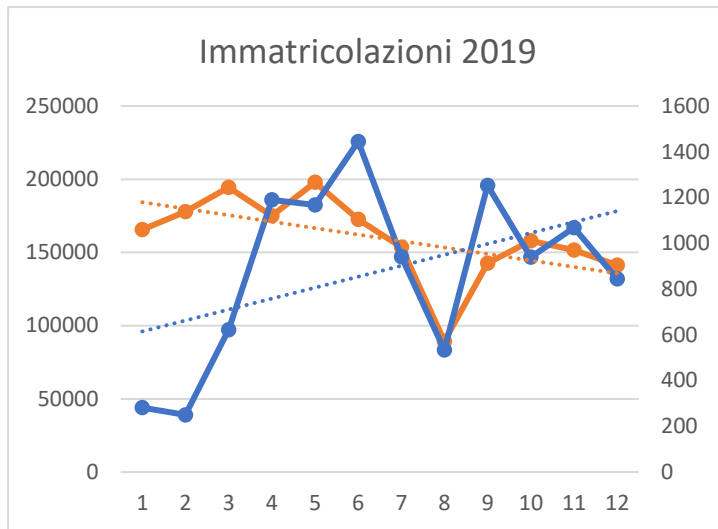
L'andamento delle immatricolazioni dei veicoli elettrici è opposto a quello del totale veicoli, si ha infatti una crescita durante l'anno, pur sempre caratterizzata da un forte calo delle immatricolazioni nel mese di agosto. Oltre alla fisiologica decelerazione estiva, in pandemia hanno inciso anche le problematiche legate al rallentamento della produzione e fornitura di semiconduttori, che hanno determinato ritardi nelle consegne dei nuovi veicoli venduti.

Il mercato delle auto elettriche ha dimostrato di essere più resiliente rispetto a quello tradizionale a diesel e benzina. A livello globale, come emerge da [8], quasi tutte le case automobilistiche internazionali presentano un andamento azionario sensibilmente peggiore rispetto all'indice S&P 500¹³ (che ha perso circa il 15%). L'unica eccezione è rappresentata da Tesla che, in poco più di un mese, ha recuperato una parte consistente delle perdite registrate dall'inizio della crisi; questa dinamica segnala il vantaggio competitivo del posizionamento della casa automobilistica in una nicchia di mercato ad elevato valore aggiunto e innovativa, come quella dei veicoli elettrici di alta gamma.

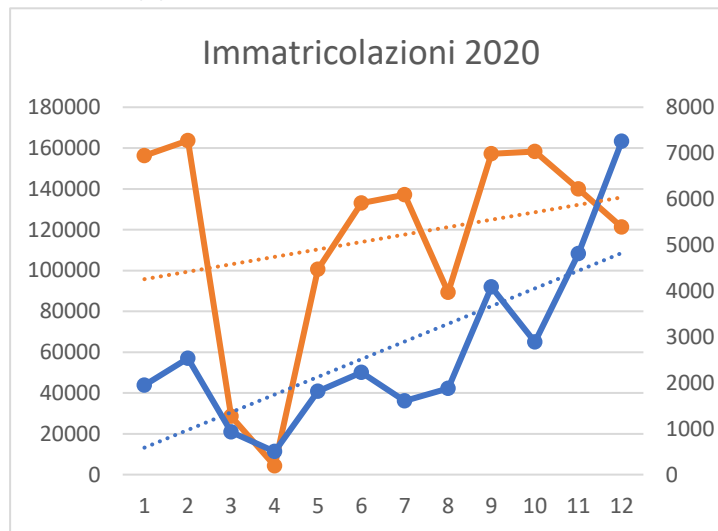
L'ascesa del comparto elettrico è stata possibile grazie a politiche incentivanti, e l'Italia, nel 2019, con l'*Ecobonus* [9] ha stanziato 312 milioni di € per sussidi alla mobilità sostenibile. Nel 2021 con la *Legge di Bilancio* ha stanziato ulteriori 420 milioni di €.

¹² DECRETO DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI 9 marzo 2020

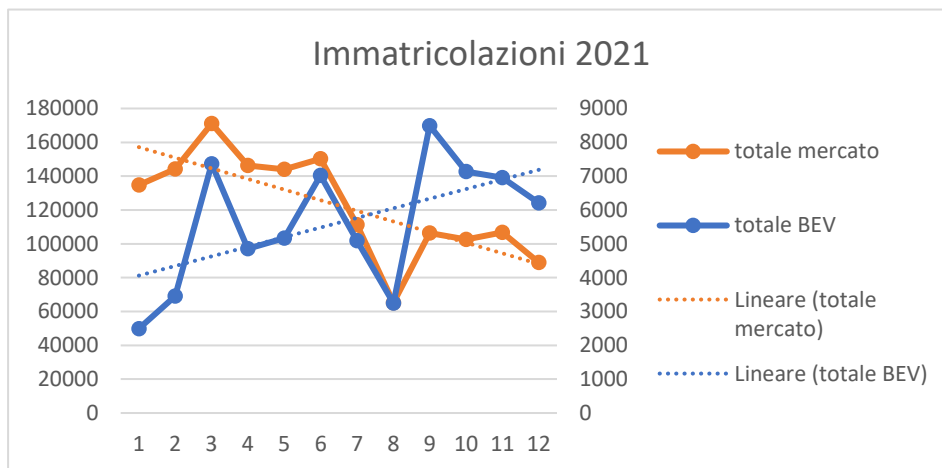
¹³ Standard & Poor's 500 è un indice azionario statunitense che segue l'andamento di un paniere azionario formato dalle aziende statunitensi a maggior capitalizzazione.



(c) Andamento delle immatricolazioni nel 2019



(c) Andamento delle immatricolazioni nel 2020



(c) Andamento delle immatricolazioni nel 2021

Figura 10 Andamento delle immatricolazioni negli anni 2019 (a), 2020 (b), 2021 (c)

Volendo poi conoscere la distribuzione geografica dei veicoli elettrici sul territorio italiano, basandosi sui dati dell'Associazione Nazionale Filiera Industria Automobilistica (ANFIA) si è visto che la quota maggioritaria di veicoli elettrici in circolazione si trova, per un 70% circa, nell'area Nord del Paese (Figura 11). Questo andamento rispecchia anche la diffusione dell'infrastruttura di ricarica necessaria [10].

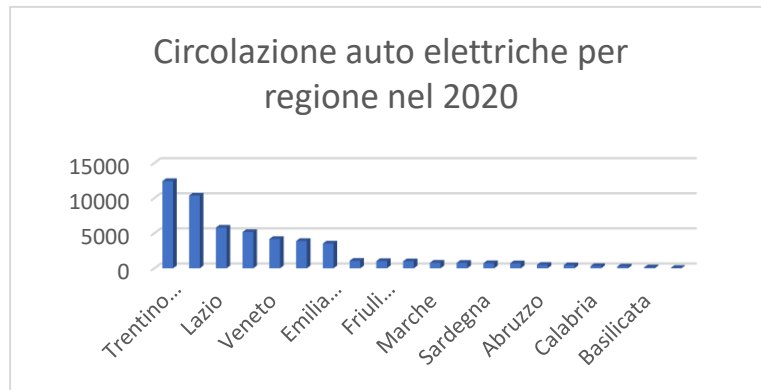


Figura 11 Circolazione auto elettriche per regione nel 2020

Il numero di auto in circolazione per regione è stato rapportato alla densità di popolazione (Figura 12).

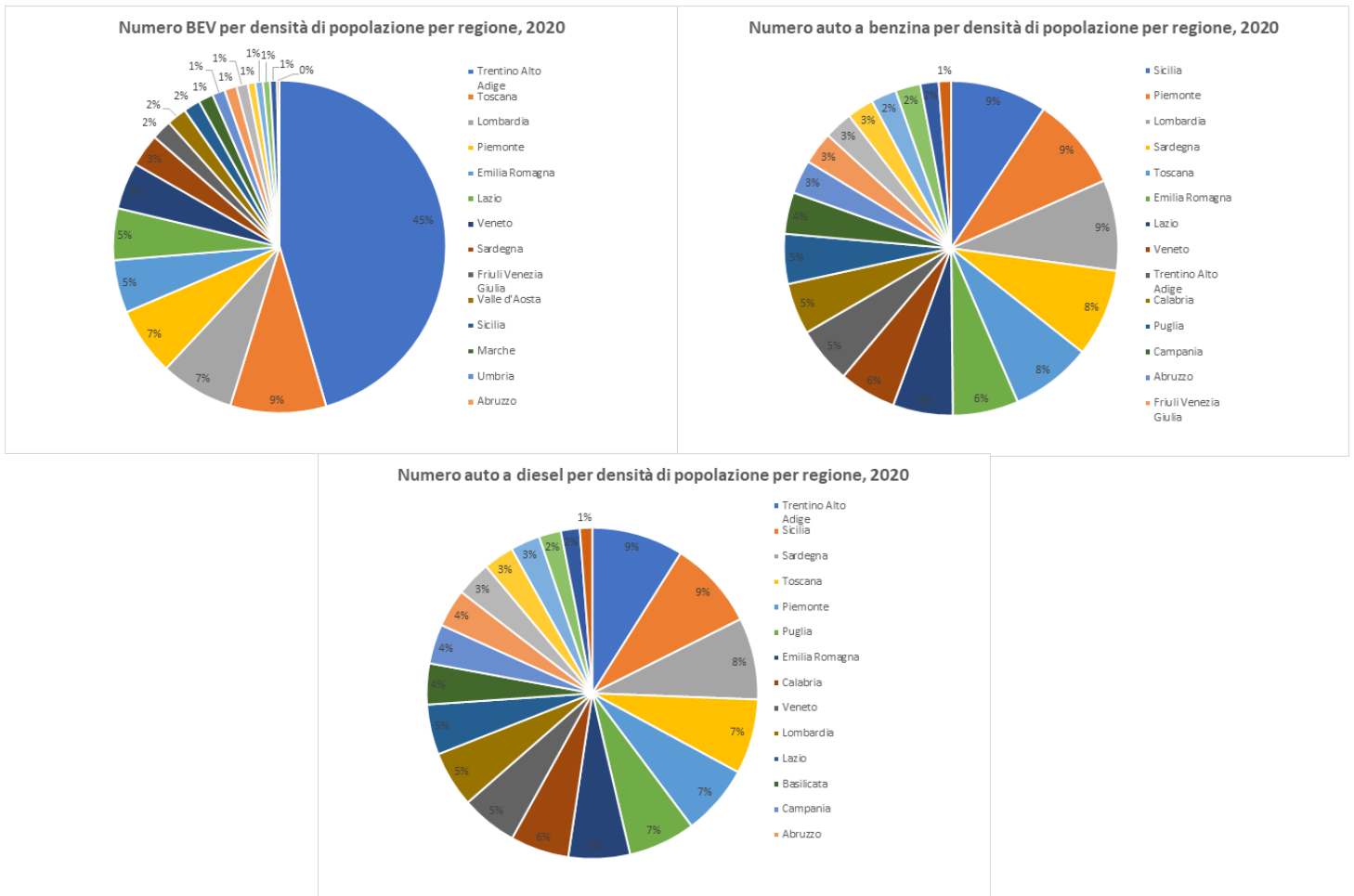


Figura 12 Circolazione auto elettriche per regione e densità di popolazione, nel 2020 [17].

Si nota come la diffusione delle auto a diesel e benzina sia più uniformemente distribuita tra le diverse regioni rispetto alla diffusione di quelle elettriche. Si nota come il numero di auto elettriche per densità di popolazione sia maggiore per il Trentino-Alto Adige.

Nella Figura 13 vengono presentate le immatricolazioni effettuate nel 2020 suddivise per alimentazione con dettaglio della tipologia di proprietario. Il canale di acquisto da parte di privati ha una minore incidenza sulle vetture elettriche, soprattutto rispetto alle auto a benzina, data la ridotta offerta di modelli su fasce di prezzo inferiori. Il noleggio senza conducente, invece, presenta un'incidenza maggiore sui veicoli elettrici, dimostrando una propensione verso modelli di acquisto che riducono l'investimento iniziale.

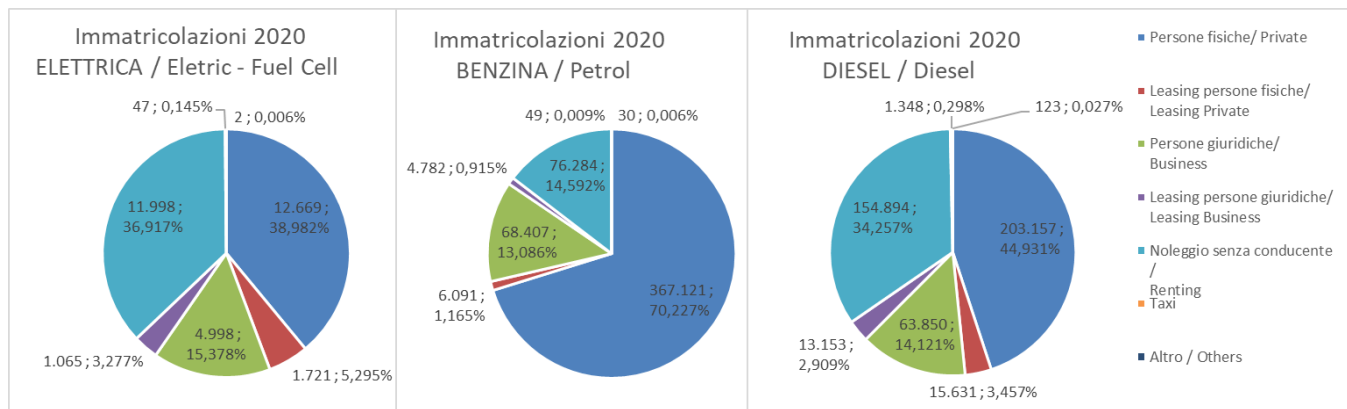


Figura 13 Immatricolazioni veicoli per alimentazione e per proprietario [17].

2.2 Mercato Elettrico

Nascita

Il Mercato Elettrico (ME) in Italia nasce in seguito al recepimento della Direttiva 96/92/CE (e s.m.i) dell'Unione Europea tramite il decreto legislativo D.Lgs. 16 marzo 1999, n.79, (c.d. Decreto Bersani). La creazione di un mercato libero nasce dall'esigenza di creare concorrenza fra gli operatori che sono così spinti a migliorare l'efficienza degli impianti per ridurre il costo marginale¹⁴ di produzione dell'elettricità. Fino a quel momento, dal 1962, l'unico attore del settore elettrico era l'Ente Nazionale per l'Energia Elettrica, al quale era riservato il compito di esercitare nel territorio nazionale le attività di produzione, importazione ed esportazione, trasporto, trasformazione, distribuzione e vendita dell'energia elettrica da qualsiasi fonte prodotta. Il Decreto Bersani ha invece reso completamente libere tali attività ad eccezione di quelle di distribuzione, trasmissione e dispacciamento che sono adesso riservate allo Stato.

La produzione diventa quindi un'attività liberalizzata e l'energia prodotta può essere auto consumata, venduta attraverso contratti bilaterali, ceduta alla rete come eccedenza o venduta tramite la borsa elettrica (entrata in funzione ad aprile 2004). Il decreto limita al 50% la quota massima dell'energia elettrica prodotta e importata in Italia per soggetto e viene inoltre imposto ai produttori e importatori di immettere in rete energia da fonti rinnovabili pari ad almeno il 2% di quella da loro trattata.

L'importazione è regolata dall'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA) secondo le indicazioni del Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) attraverso l'emanazione di apposite delibere che danno le direttive a Terna per l'assegnazione della capacità transfrontaliera disponibile.

L'attività di trasmissione, che consiste nel trasporto di elettricità sulle linee di alta e altissima tensione, è affidata a Terna.

L'attività di distribuzione, inerente al trasporto e alla fornitura di elettricità sulle linee di bassa e media tensione, viene affidata dal MISE ai distributori tramite concessioni trentennali (una sola concessione di distribuzione per ambito comunale).

Anche la liberalizzazione della fase di vendita è stata oggetto della riforma, ma in modo più graduale, tramite l'individuazione delle figure del Cliente Idoneo e del Cliente Vincolato. Il cliente idoneo è la persona fisica o

¹⁴ costo marginale unitario corrisponde al costo di un'unità aggiuntiva prodotta, cioè alla variazione nei costi totali di produzione che si verifica quando si varia di un'unità la quantità prodotta.

giuridica che ha la capacità di stipulare contratti di fornitura con qualsiasi produttore o grossista. Dal 2004 è cliente idoneo ogni cliente finale non domestico (ovvero dotato di P.IVA), mentre dal 2007, ogni cliente finale è considerato idoneo. Sono clienti vincolati, invece, quelli che scelgono di restare, anche solo temporaneamente, nel mercato vincolato. Per tutelare questi ultimi è stata istituita la figura dell'Acquirente Unico che provvede a rifornire i clienti appartenenti al mercato di "maggior tutela" attraverso i distributori locali ad una tariffa unica nazionale definita dall'ARERA (d'ora in poi detta anche Autorità).

Struttura

Il ME, visto come la sede delle transazioni di compravendita all'ingrosso di energia elettrica, è gestito dal Gestore dei Mercati Energetici (GME), società controllata dal Gestore dei Sistemi Energetici (GSE). A differenza di altre commodity, per l'energia elettrica non vengono messi sul mercato prodotti o beni di consumo reali, ma si vende la promessa di produrre, in un dato giorno e ad una data ora, una certa quantità di energia. Il ME si articola nel Mercato Elettrico a Pronti (MPE) e nel Mercato a Termine dell'Energia elettrica con obbligo di consegna e ritiro (MTE).

Nel MPE, lo scambio dei prodotti trattati avviene con liquidazione immediata (con differimento di pochi giorni) e prevede l'incontro tra domanda e offerta, in cui la controparte di ogni operatore è il mercato stesso, con il meccanismo del prezzo marginale. Non è un mercato puramente finanziario finalizzato solo alla determinazione dei prezzi, ma è un mercato "fisico" dove si definiscono i programmi di immissione e prelievo.

È suddiviso in:

- Mercato del Giorno Prima (MGP), che ha per oggetto la contrattazione di blocchi di energia per tutte le ore del giorno successivo, tramite offerte di vendita e acquisto, in cui vengono indicate la quantità e il prezzo massimo e minimo al quale gli operatori sono disposti ad acquistare o vendere. Questo si svolge in un'unica sessione che si apre alle 8:00 del nono giorno antecedente il giorno della consegna e si chiude alle ore 12:00 del giorno precedente il giorno di consegna. Una volta terminato il periodo di presentazione delle offerte, queste vengono accettate sulla base del merito economico e del rispetto dei limiti di transito tra le zone, e gli esiti vengono comunicati entro le 12:58 del giorno precedente il giorno di consegna.
- Mercato Infragiornaliero (MI) che dà la possibilità agli operatori di correggere i programmi definiti sul MGP, attraverso ulteriori offerte di acquisto o vendita, all'avvicinarsi del tempo reale in cui l'offerta, se accettata, verrà chiamata.
- Mercato del Servizio di Dispacciamento (MSD) che ha per oggetto la stipula da parte di Terna di contratti di acquisto e vendita ai fini dell'approvvigionamento di risorse per il servizio di dispacciamento. Per tenere conto anche di eventuali problemi o guasti imprevisti agli impianti, che si potrebbero verificare il giorno della consegna, è infatti necessario predisporre una fase di mercato in cui poter reperire le risorse necessarie a far fronte alle possibili variazioni dei programmi determinati alla chiusura di MGP e MI. Si articola in due fasi: una di programmazione, MSD-ex ante, e una di bilanciamento, MB (Mercato del Bilanciamento).
 - Nell'MSD-ex ante Terna si approvvigiona di capacità ai fini della risoluzione delle congestioni residue e della costituzione dei margini di riserva per il giorno successivo. Il mercato si articola in sei sottofasi di programmazione. Le offerte vengono presentate in un'unica sessione che va dalle 12:55 alle 17:00 del giorno antecedente il giorno di consegna. Gli esiti del MSD1 vengono comunicati entro le 21:45 del giorno precedente il giorno di consegna. Gli esiti del MSD2 vengono comunicati entro le 2:15 del giorno di consegna. Gli esiti del MSD3 entro le 6:15, gli esiti del MSD4 entro le 10:15, gli esiti del MSD5 entro le 14:15 e gli esiti del MSD6 vengono comunicati entro le 18:15 del giorno di consegna.

- Nel MB vengono presentate continuamente offerte in tempo reale che Terna usa per bilanciare il sistema a fronte di scostamenti dai programmi stabiliti alla chiusura di MGP e MI. L'apertura della seduta per la presentazione delle offerte per il MB è alle 22:30 del giorno antecedente il giorno di consegna e gli operatori possono presentare offerte sino a 1 ora prima dell'inizio dell'ora cui le offerte si riferiscono.
- Mercato dei Prodotti Giornalieri (MPEG), qui gli operatori acquistano e vendono prodotti giornalieri con obbligo di consegna dell'energia.

Il Mercato a Termine dell'Energia, MTE, è un mercato di natura puramente finanziaria, è sede di negoziazioni, in modalità continua, di contratti a termine dell'energia elettrica con obbligo di consegna e ritiro. Si contratta l'acquisto dei lotti di energia che verrà prodotta in futuro (a distanza di un mese, di trimestri, di un anno) al prezzo di mercato che si ha all'istante della contrattazione.

Funzionamento

Il ME è suddiviso in più porzioni di reti di trasmissione, dette "zone", definite in base ai limiti fisici di transito identificate da Terna. Vengono identificate due tipologie di zone:

- zone geografiche: Nord, Centro-Nord, Centro-Sud, Sud, Sicilia, Sardegna.
- zone virtuali. Queste, sono zone rappresentative di una interconnessione con l'estero e quelle attualmente attive sono Francia, Svizzera, Austria, Slovenia, Corsica, Grecia, Malta e Montenegro; oppure identificano un polo di produzione limitato. Queste ultime sono zone virtuali nazionali costituite da una sola unità di produzione, la cui capacità di interconnessione con la rete è inferiore alla potenza installata delle unità stesse. La produzione di tali unità è contingentata per evitare problemi alla rete. Un esempio è costituito dai poli di Priolo, Rossano, Monfalcone, Foggia e Brindisi, attualmente non attivi.

Ogni zona è un insieme di punti di offerta, vale a dire di singole unità o aggregati di unità di produzione o consumo. Le unità di produzione sono dette punti di immissione, mentre le unità di consumo sono dette punti di prelievo. Tramite la Borsa Elettrica¹⁵ e i contratti bilaterali¹⁶, per ogni punto di offerta viene definito, per il giorno successivo, un programma orario di immissione e prelievo tramite il quale vengono stabilite le quantità di energia elettrica che chi ha stipulato i contratti si impegna a immettere/prelevare ora per ora e il prezzo unitario di energia relativo, in €/MWh.

Terminata la seduta di presentazione delle offerte, il GME attiva il processo per la "risoluzione del mercato": le offerte di vendita definite valide vengono ordinate per prezzo crescente in una curva di offerta aggregata, e le offerte di acquisto ricevute definite valide sono ordinate per prezzo decrescente in una curva di domanda aggregata. L'intersezione delle due curve determina la quantità di energia complessivamente scambiata sulla borsa elettrica, il prezzo di equilibrio e le offerte accettate ed i programmi di immissione e prelievo, ottenuti come somma delle offerte accettate riferite, in una stessa ora, ad uno stesso punto di offerta. Se i flussi sulla rete derivanti dai programmi non violano nessun limite di transito di energia sugli elettrodotti, il Prezzo di equilibrio è unico in tutte le zone e tutte le offerte accettate verranno ordinate con il prezzo di equilibrio e non con i prezzi di vendita minimi e di acquisto massimi indicati nell'offerta (criterio del prezzo marginale). Se almeno un limite di transito sugli elettrodotti invece risulta violato, il mercato viene separato in più zone di mercato e per ognuna di queste si ripete il processo di incrocio tra curva di domanda e curva di offerta. L'esito di questa operazione, definita di market splitting, è un prezzo di equilibrio zonale diverso nelle due

¹⁵ Borsa Elettrica, è il luogo virtuale in cui avviene l'incontro tra domanda e offerta per la compravendita dell'energia elettrica all'ingrosso. La gestione economica della borsa elettrica è affidata al GME ai sensi dell'art. 5 del d.lgs. 79/99.

¹⁶ Contratti bilaterali, sono contratti di fornitura di energia elettrica o di gas naturale concluso tra gli operatori al di fuori dei mercati gestiti dal GME

zone di mercato. Se a seguito di questa soluzione risultano violati ulteriori vincoli di transito, all'interno di ciascuna zona di mercato, si ripete il processo di suddivisione fino ad ottenere un esito compatibile con i vincoli di rete. Una volta ottenuto tale esito, le offerte di acquisto in Italia sono accettate ad un Prezzo Unico di acquisto su base Nazionale (PUN), pari alla media dei prezzi di vendita zonali ponderati per i consumi zonali. Le offerte di vendita invece, anche nel caso di market splitting sono remunerate al prezzo di equilibrio zonale diverso per ogni zona.

2.2.1 Mercato dei servizi di dispacciamento

Per garantire l'equilibrio elettrico del Paese e far in modo che domanda e offerte di energia siano bilanciate istante per istante, la produzione da centrali, la trasmissione e l'integrazione delle rinnovabili devono essere coordinate mantenendo gli standard di sicurezza e di qualità. Queste attività prendono il nome di dispacciamento e in Italia sono affidate a Terna, che, inoltre, svolge un ruolo importante per portare a termine gli obiettivi di decarbonizzazione e transizione energetica.

Terna opera basandosi sul Codice di Rete [11], un documento rilasciato sulla base delle direttive dell'ARERA (delibera n.250/04) che tratta temi quali la trasmissione, la gestione e la manutenzione della rete, le regole del dispacciamento, lo sviluppo in sicurezza della rete e definisce i rapporti tra Terna e gli utenti. In particolare, per lo scopo di questa tesi, è stato analizzato il Capitolo 4, contenente le regole per il dispacciamento.

Gli attori del MSD sono gli Utenti del Dispacciamento (UdD), il Gestore del Mercato Elettrico e il Gestore della rete elettrica.

Le tipologie di unità che partecipano al mercato sono:

- le Unità di Produzione, che a loro volta si distinguono in rilevanti e non rilevanti: le unità rilevanti sono quelle che hanno una potenza complessiva non inferiore a 10 MVA e costituiscono un singolo punto di immissione mentre le unità non rilevanti vengono aggregate in gruppi e ogni gruppo fa riferimento a un singolo punto di offerta in immissione,
- le Unità di Consumo (che sono non rilevanti),
- le Unità Virtuali, a loro volta suddivise in: unità virtuali di produzione, unità di importazione e unità di esportazione.

Le risorse trattate da Terna per gestire in sicurezza il sistema elettrico sono:

- risorse per la gestione delle congestioni servono per far fronte alle situazioni in cui non è possibile fornire la richiesta di capacità di negoziazione internazionale a fronte delle limitazioni alle transazioni economiche poste per stabilizzare la rete di trasmissione.
- risorse per la riserva primaria: hanno lo scopo di correggere automaticamente gli squilibri istantanei tra produzione e fabbisogno totale in modo da mantenere la frequenza di rete vicina al valore nominale. La fornitura di queste risorse avviene grazie all'intervento dei regolatori di velocità delle turbine.
- risorse per la riserva secondaria: hanno lo scopo di compensare gli scarti tra fabbisogno e produzione del sistema elettrico nazionale, riportando gli scambi di potenza alla frontiera ai valori di programma e contribuendo quindi a ristabilire la frequenza europea. Vengono fornite automaticamente da un regolatore centralizzato.
- risorse per la riserva terziaria servono per costituire margini rispetto alla potenza minima o massima nei programmi in esito a MSD che vengono predisposti durante la fase di programmazione o di gestione in tempo reale e sono eventualmente attivati in tempo reale con l'invio di ordini di dispacciamento nel contesto del servizio di bilanciamento.

- risorse per il bilanciamento vengono utilizzate per mantenere l'equilibrio tra immissioni e prelievi di energia elettrica, risolvere le congestioni di rete, ripristinare i margini di riserva secondaria di potenza.

Ad eccezione delle risorse per fornire il servizio di regolazione primaria che devono essere fornite obbligatoriamente da parte delle unità rilevanti e che non sono "a mercato", tutte le altre sono a mercato con partecipazione volontaria remunerata come da regolamentazione.

Per quanto riguarda i prodotti negoziati all'interno di ciascun servizio, solo per il servizio di regolazione secondaria vi è corrispondenza con il servizio offerto infatti possono essere presentate offerte per la regolazione secondaria a salire e a scendere. Per quanto riguarda gli altri servizi, i prodotti offerti sono rappresentati da offerte di accensione e altri servizi a salire e spegnimento e altri servizi a scendere.

Le unità abilitate a fornire i servizi di cui sopra devono:

obbligatoriamente inserire nella piattaforma del Gestore del mercato offerte predefinite per la fase di programmazione, mentre hanno la facoltà di inserire quotidianamente offerte non predefinite con riferimento alla fase di programmazione (in assenza di offerte non predefinite il gestore della rete utilizza offerte predefinite). In particolare, per la fornitura di Altri Servizi, le offerte devono essere costituite da:

- almeno 1 e fino a 3 coppie di quantità e prezzi per le offerte in vendita, relative ad incrementi di immissione dal maggior valore tra il programma di riferimento ¹⁷e la potenza minima sino alla potenza massima;
- almeno 1 e fino a 3 coppie di quantità e prezzi per le offerte in acquisto, relative a decrementi di immissione dal maggior valore tra il programma di riferimento e la potenza minima sino alla potenza minima.

inserire in modo facoltativo, quotidianamente e per ciascun periodo orario offerte con riferimento al MB. In caso di mancata presentazione delle offerte sul MB per un determinato periodo orario, il Gestore della rete utilizza le offerte valide ai fini della fase di programmazione riferite al periodo orario in oggetto. In particolare, per l'approvvigionamento e l'utilizzo di altri servizi diversi dalla riserva secondaria di potenza, tali offerte devono essere costituite da:

- almeno 1 e fino a 4 coppie di quantità e prezzi per le offerte in vendita per Altri servizi, relative ad incrementi di immissione dal maggior valore tra il programma finale cumulato e la potenza minima sino alla potenza massima¹⁸;
- almeno 1 e fino a 4 coppie di quantità e prezzi per le offerte in acquisto per Altri servizi, relative a decrementi di immissione dal maggior valore tra il programma finale cumulato e la potenza minima sino alla potenza minima.

Il Gestore della rete verifica i vincoli di offerta per la fase di programmazione e per il MB e, in caso di mancato rispetto, procede alla modifica delle quantità e prezzi offerti come descritto nel codice di rete.

Per ciascuna sottofase della fase di programmazione, Terna seleziona le offerte da accettare o riservare minimizzando l'esborso complessivo nei periodi orari corrispondenti alla sottofase, per il costo di approvvigionamento delle risorse di dispacciamento e per il loro utilizzo nella fase reale, nel rispetto dei

¹⁷ Per programma di riferimento si intende il programma intermedio cumulato in input alla sottofase della fase di programmazione in esame. Quest'ultimo è pari al programma post-MGP eventualmente modificato in esito a ciascuna sessione del MI, il più recente programma intermedio cumulato disponibile prima dell'esecuzione di una sottofase di MSD ex-ante è considerato come programma di riferimento per le offerte in quella specifica sottofase.

¹⁸ È la potenza massima disponibile in immissione.

vincoli di sistema e dei vincoli di riferiti alle unità abilitate. Il costo sostenuto da Terna per le attività di dispacciamento entra in bolletta alla voce uplift¹⁹.

2.2.2 Riforme del MSD

Come detto nel Capitolo 1.3, la necessità di riforme nasce dalla massiccia introduzione del rinnovabile nella rete e trova espressione nel Testo Integrato del Dispacciamento Elettrico (TIDE).

Con la deliberazione 30/2017/R/eel [12], l'ARERA ha previsto una prima apertura del MSD, tramite progetti pilota, per consentire l'acquisizione di elementi utili per la riforma organica del dispacciamento e per rendere disponibili nuove risorse per il dispacciamento. I progetti pilota sono individuati da Terna e ammettono la partecipazione al Mercato delle Unità di Produzione (di seguito: UP) non già abilitate, inclusi i sistemi di accumulo (equiparati alle UP), ai sistemi di accumulo abbinati ad UP già abilitate e alle unità di consumo (di seguito: UC) non rientranti nel contratto di dispacciamento dell'Acquirente Unico²⁰. Questi progetti pilota hanno come obiettivo quello di sperimentare la partecipazione al mercato di tali unità, le modalità di aggregazione delle medesime unità, le modalità di remunerazione dei servizi ancillari non già remunerati, forme di approvvigionamento a termine delle risorse per il dispacciamento.

Finora possono partecipare al mercato solo alcune unità dette "qualificate" (UP programmabili). Con l'introduzione della riforma si parla invece di portafogli abilitati o non abilitati e non più di unità, estendendo la partecipazione al mercato di aggregati di unità.

Sono quindi stati avviati da Terna dei progetti pilota con lo scopo di raccogliere elementi utili per la riforma del dispacciamento; tali progetti sono UVAC, UVAP, UVAM.

Quest'ultimo è quello su cui ci si sofferma all'interno di questo elaborato in quanto abilita la tecnologia V2G alla partecipazione ai servizi ancillari.

Progetto pilota UVAM

Le Unità Virtuali Abilitate Miste sono caratterizzate dalla presenza di uno o più dei seguenti elementi:

- unità di produzione non rilevanti,
- unità di produzione rilevanti non obbligatoriamente già abilitate al MSD (queste ultime qualora condividano il punto di connessione con unità di consumo),
- unità di consumo (ad oggi tutte non rilevanti),
- impianti di accumulo "stand alone" o abbinati a unità di produzione non rilevanti e/o unità di consumo

La controparte di Terna per la fornitura delle risorse per il dispacciamento è il Balancing Service Provider (BSP o aggregatore) che può essere distinto dall'utente del dispacciamento responsabile dei punti di dispacciamento (Balancing Responsible Party, BRP).

Le UVAM possono essere abilitate alla fornitura di risorse per la risoluzione delle congestioni a programma, la riserva terziaria rotante e per il bilanciamento. Devono poter modulare la loro capacità a salire (incrementare l'immissione o ridurre il prelievo rispetto alla baseline²¹) e/o a scendere (ridurre l'immissione

¹⁹ L'Uplift è il corrispettivo unitario per l'approvvigionamento delle risorse nel MSD - è stimato da Terna su base trimestrale e viene fatturato agli UdD per i prelievi effettivi di energia elettrica del trimestre. È il rapporto tra controvalore delle varie voci di costo che lo compongono e l'energia prelevata dalla rete.

²⁰ Società pubblica nata per approvvigionare l'energia elettrica per i clienti domestici e le PMI che ancora non sono passati al mercato libero. Dal 2009, si sono progressivamente ampliate le attività di AU a beneficio del corretto funzionamento dei mercati energetici.

²¹ È il programma in potenza dei punti sottostanti l'UVAM per ogni periodo quart'orario del giorno.

o incrementare il prelievo rispetto alla baseline) per una quantità detta rispettivamente Potenza Massima Abilitata²² e Potenza Minima Abilitata²³ non inferiore in valore assoluto a 1MW.

L'UVAM, per ogni quarto d'ora i , deve fornire una quantità di energia pari a $\frac{Q_{MSD}}{4}$,

dove Q_{MSD} è il saldo delle quantità accettate nel MSD ex ante e MB

$$Q_{MSD} = \sum q_{ex-ante}^{vendita}(i) - \sum q_{ex-ante}^{acquisto}(i) + \sum q_{MB}^{vendita}(i) - \sum q_{MB}^{acquisto}(i) \quad [1]$$

I servizi offerti vengono remunerati col normale meccanismo pay-as-bid usato nell'MSD, sulla base di un corrispettivo variabile pari al prezzo offerto dal BSP in caso di attivazione delle risorse su MSD. È prevista anche una remunerazione fissa che dipende dalla potenza contrattualizzata a termine attraverso delle aste.

La procedura di approvvigionamento a termine prevede l'approvvigionamento di un prodotto annuale, di tre prodotti infrannuali e di dodici prodotti mensili. Le aste cui i BSP partecipano servono per assegnare i seguenti prodotti: Pomeridiano, Serale1 e Serale2 e il processo di assegnazione avviene tramite asta al ribasso rispetto al premio fissato da Terna (Strike Price) con meccanismo di assegnazione del prezzo di tipo *pay as bid*.

Terna effettua delle verifiche sulle quantità effettivamente fornite dall'UVAM per definire la remunerazione.

Verifica remunerazione variabile MSD

La verifica è rispettata se nel quarto d'ora viene fornita

$$|Q_{MSD}| \geq 0,125 \text{ MWh} \quad [2]$$

Qualora vengano rispettate le disequazioni [3] e [4] allora Terna provvede a elargire la piena remunerazione $\alpha(i)$ in quanto il BSP fornisce l'energia richiesta

$$E_M \geq E_0 + Q_{MSD}(i) \text{ se } Q_{MSD}(i) \geq 0 \text{ MWh} \quad [3]$$

$$E_M \leq E_0 + Q_{MSD}(i) \text{ se } Q_{MSD}(i) \leq 0 \text{ MWh} \quad [4]$$

Dove

E_M è l'energia prelevata/impressa misurata nei punti UVAM,

E_0 è il saldo dell'energia programmata in immissione/prelievo dal BSP, definita come:

$$E_0(i) = \frac{[B(i)] * 1ora}{4} + \Delta B \quad [5]$$

Dove

$B(i)$, detta baseline, è il programma complessivo quart'orario in potenza riferito all'UVAM per il giorno D

ΔB è un di correzione della baseline pari a:

$$\Delta B = \max \left\{ 0, \sum_{i=1}^n \left[E_M(i) - B \frac{i}{4} \right] / n \right\} \text{ se } Q_{MSD}(i) \geq 0 \text{ MWh} \quad [6]$$

$$\Delta B = \min \left\{ 0, \sum_{i=1}^n \left[E_M(i) - B \frac{i}{4} \right] / n \right\} \text{ se } Q_{MSD}(i) \leq 0 \text{ MWh} \quad [7]$$

²² È il massimo incremento di immissione che l'UVAM può rendere a Terna.

²³ È il massimo decremento di immissione che l'UVAM può rendere disponibile a Terna.

Dove n è il numero dei quarti d'ora precedenti quello in cui viene fatta la correzione della baseline cioè in cui viene controllato il rispetto della [2], n ha un massimo valore pari ad otto.

Terna effettua questa correzione in modo che la differenza tra l'energia misurata E_M e la baseline B sia costante durante il servizio e pari a ΔB . Se le equazioni [3] e [4] non vengono rispettate si ha uno sbilanciamento ΔE

$$\Delta E(i) = E_M(i) - [E_0(i) + Q_{MSD}(i)] \quad [8]$$

che risulta in delle penalità applicate al BSP e calcolate come di seguito:

	$Q_{MSD}(i) > 0$ $\Delta E(i) < 0$	$Q_{MSD}(i) < 0$ $\Delta E(i) > 0$
$\left \frac{\Delta E}{Q_{MSD}} \right * 100 \leq 5\%$	$\gamma = \Delta E * \bar{P}_{MSD\uparrow}^{UVAM}(i)$ [9]	$\gamma = \Delta E * \bar{P}_{MSD\downarrow}^{UVAM}(i)$ [10]
$\left \frac{\Delta E}{Q_{MSD}} \right * 100 > 5\%$	$\gamma = \Delta E * \max \{ \bar{P}_{MSD\uparrow}^{UVAM}(i); P_{MB\uparrow}^{marg}(i) \}$ [11]	$\gamma = \Delta E * \min \{ \bar{P}_{MSD\downarrow}^{UVAM}(i); P_{MB\downarrow}^{marg}(i) \}$ [12]

Dove:

$\bar{P}_{MSD\uparrow}^{UVAM}(i)$ e $\bar{P}_{MSD\downarrow}^{UVAM}(i)$ sono rispettivamente il prezzo medio ponderato, nel quarto d'ora i , delle offerte accettate in vendita e in acquisto;

$P_{MB\uparrow}^{marg}(i)$ e $P_{MB\downarrow}^{marg}(i)$ sono rispettivamente il prezzo più alto/basso, nel quarto d'ora i , delle offerte accettate in vendita/acquisto ed incremento/decremento per Altri Servizi nel MB nella macro-zona dell'UVAM.

La remunerazione nel caso in cui siano rispettate le [3] e [4] è pari a:

$$\alpha(i) = Q_{MSD}(i) * \bar{P}_{MSD\uparrow}^{UVAM}(i) \text{ se } Q_{MSD}(i) > 0 \quad [13]$$

$$\alpha(i) = Q_{MSD}(i) * \bar{P}_{MSD\downarrow}^{UVAM}(i) \text{ se } Q_{MSD}(i) < 0 \quad [14]$$

Mentre nel caso in cui le [3] e [4] non siano rispettate, la remunerazione sarà ridotta del quantitativo γ

$$\alpha(i) = Q_{MSD}(i) * \bar{P}_{MSD\uparrow}^{UVAM}(i) + \gamma \text{ se } Q_{MSD}(i) > 0 \text{ e } \Delta E < 0 \quad [15]$$

$$\alpha(i) = Q_{MSD}(i) * \bar{P}_{MSD\downarrow}^{UVAM}(i) + \gamma \text{ se } Q_{MSD}(i) < 0 \text{ e } \Delta E < 0 \quad [16]$$

Verifica remunerazione fissa

Terna verifica mensilmente che le offerte presentate dai BSP sul MSD non siano inferiori alla Quantità Assegnata²⁴ in fase d'asta e che non siano superiori alla Potenza Massima Abilitata. Verifica, inoltre, che il BSP sia capace di rendere disponibile per ogni ora h un margine di modulazione $M_s(h)$

$$M_s(h) = \hat{L} - \bar{E}_M(h) \quad [17]$$

Dove

\hat{L} è la somma dei massimi valori di potenza attiva che possono essere immessi in rete attraverso l'UVAM, detto anche limite superiore.

²⁴ Potenza assegnata a termine

In seguito a tali verifiche, se le offerte risultano conformi, Terna procederà a corrispondere al BSP il Corrispettivo Fisso Giornaliero CFG moltiplicato per la Quantità Assegnata, per il numero di giorni del mese in cui tutti gli obblighi sono rispettati.

Con riferimento all'assegnazione del prodotto pomeridiano, se il BSP ha presentato Offerte Conformi per 3 ore consecutive sul MSD e queste non sono state attivate, si procede con la verifica del margine di modulazione a salire orario. Se il margine di modulazione a salire orario $M_S(h)$, per ogni ora oggetto di verifica, è superiore alle Offerte Conformi $OC(h)$ relative alle rispettive ore, si ottiene una piena remunerazione giornaliera, pari al prodotto tra il CFG e la Quantità Assegnata. Invece, se non è rispettata la precedente condizione, si procede con un'ulteriore verifica. Se $M_S(h)$ è superiore al 90% della Quantità Assegnata per almeno 2 ore consecutive si ottiene una remunerazione con aggiunta di penale. Viene calcolato un quantitativo $X(h)$ utile a definire il CFG da erogare e la penale, con valori compresi tra 1 ed il rapporto tra il margine di modulazione a salire orario reso disponibile e la Quantità Assegnata. In questo caso, Terna corrisponde al BSP il prodotto tra il CFG ed il minimo valore dei rapporti orari $X(h)$. La penale che viene applicata al BSP è calcolata come il 20% della differenza tra il CFG massimo erogabile ed il CFG effettivamente erogato, ovvero moltiplicato per il minimo valore dei rapporti orari $X(h)$. Ovviamente, se questa condizione in cui deve essere garantito almeno il 90% della Quantità Assegnata per due ore consecutive non è verificata, la remunerazione del giorno è nulla.

Qualora siano state presentate Offerte Conformi sul MSD solo per 2 ore consecutive del prodotto pomeridiano, e queste non siano state attivate, si procede con la stessa logica di verifica, con la differenza che il CFG viene ridotto del 33% perché non si stanno facendo offerte per l'intero prodotto pomeridiano ma per $\frac{2}{3}$ d'esso.

2.3 Il ruolo di Edison come operatore V2X

Edison S.p.A. è un'azienda italiana attiva nei settori dell'approvvigionamento, produzione e vendita di energia elettrica e gas naturale, controllata dal Gruppo francese Électricité de France (EDF).

Nel 2018 e nel 2019 nascono rispettivamente a Torino e Milano, le Officine Edison, spazi dedicati all'innovazione tecnologica, la ricerca e lo sviluppo nel settore energetico. In collaborazione con i Politecnici di Torino e Milano, vengono trattate tematiche quali data analytics, mobilità elettrica, ottimizzazione, efficienza energetica per il territorio e soluzioni intelligenti per la casa connessa e per la città.

All'interno della strategia E-Mobility dell'azienda, la tecnologia V2G rappresenta un potenziale ambito di sviluppo, considerando la gamma di servizi che può abilitare: l'integrazione tra le reti e l'edificio in cui è installata l'infrastruttura di ricarica (paradigma Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Building) e l'integrazione diretta con le reti elettriche nel caso del V2G. Un operatore di mercato come Edison potrà sfruttare le sue competenze per gestire i punti di ricarica V2G, non appena l'evoluzione normativa e regolatoria consentirà una completa integrazione tra le infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici e le reti.

Edison, presso le Officine Torino, porta avanti il progetto V2G che studia come utilizzare al meglio le batterie dei veicoli elettrici per fornire servizi alla rete, quando i veicoli vengono collegati alle colonnine di ricarica. Il progetto opera su due fronti: da un lato, mira a esplorare le sfide tecniche associate a questa tecnologia, valutando il funzionamento dei sistemi di ricarica bidirezionali e il loro impatto su una rete elettrica simulata in un contesto di laboratorio; dall'altro lato, mira a identificare le opportunità economiche aperte dalla tecnologia e dalle evoluzioni normative del mercato elettrico italiano.

3 Caso studio: modelli stocastici impiegati

In questo Capitolo viene presentata la metodologia di creazione di alcuni dati di ingresso al modello matematico che verrà descritto in modo dettagliato nel Capitolo 4.

3.1 Pendolarismo

Uno dei dati di ingresso al codice è lo stato di carica (SOC) delle batterie dei veicoli elettrici in arrivo al parcheggio aziendale al mattino. Il SOC all'arrivo è funzione della distanza percorsa da un lavoratore tipo, per recarsi al luogo di lavoro partendo dal proprio domicilio.

Dataset ISTAT

Per ottenere quest'ultima informazione, ci si è serviti di dati reperibili sul sito dell'Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT). Nello specifico, dei dati riguardanti gli spostamenti per motivi di lavoro o di studio della popolazione residente in famiglia o in convivenza, rilevata al 15° Censimento generale datato 9 ottobre 2011, e dei dati riguardanti le relazioni spaziali e i tempi di percorrenza tra tutti i comuni italiani:

- Il file *matrix_pendo2011.txt* [13] contiene i dati relativi a 28.871.447 individui, i quali hanno dichiarato di recarsi giornalmente al luogo abituale di studio o di lavoro partendo dall'alloggio di residenza e di rientrare giornalmente nello stesso. La struttura del file è riportata nella Figura 14,

dove i campi dei comuni e delle province contengono i codici ISTAT che sono così composti:

- il codice comune è un numero progressivo a partire da 001 all'interno di ogni provincia,
- il codice provincia è un codice con tre caratteri alfanumerici nel range 001-110,
- mentre il codice Istat del comune si ottiene dalla concatenazione dei due codici precedenti.

(Esempio: 1042 (1=provincia di Torino, 42=comune di Burolo); 103052(103=provincia di Verbano-Cusio-Ossola,52=comune di Pallanzeno).

Descrizione del campo	Tipo di record		Tipo di residenza	Provincia di residenza	Comune di residenza	Sesso	Motivo dello spostamento	Luogo di studio o di lavoro
Valori	S dato riferito alle modalità assunte dalle variabili di strato : Provincia di residenza, Comune di residenza, Sesso, Motivo dello spostamento, Luogo di studio o di lavoro, Provincia abituale di studio o di lavoro, Comune abituale di studio o di lavoro, Stato estero di studio o di lavoro.		1 in famiglia;	Vedi: Elenco dei comuni italiani al 01 gennaio 2011-Istat;	Vedi: Elenco dei comuni italiani al 01 gennaio 2011-Istat;	1 maschio;	1 si reca al luogo di studio (compresi asilo nido, scuola materna e corsi di formazione professionale);	1 nello stesso comune di residenza; 2 in un altro comune italiano; 3 all'estero;
	L dato riferito alle modalità assunte dalle variabili di strato : Provincia di residenza, Comune di residenza, Sesso, Motivo dello spostamento, Luogo di studio o di lavoro, Provincia abituale di studio o di lavoro, Comune abituale di studio o di lavoro, Stato estero di studio o di lavoro, Mezzo, Orario di uscita, Tempo impiegato.		2 in convivenza;			2 femmina;		
Descrizione del campo	Provincia abituale di studio o di lavoro	Comune abituale di studio o di lavoro	Stato estero di studio o di lavoro	Mezzo	Orario di uscita	Tempo impiegato	Stima numero di individui	Numero di individui
Valori	Vedi: Elenco dei comuni italiani al 01 gennaio 2011-Istat;	Vedi: Elenco dei comuni italiani al 01 gennaio 2011-Istat;	Vedi Elenco Stati Esteri all'08 ottobre 2011-Istat;	01 treno; 02 tram; 03 metropolitana; 04 autobus urbano, filobus; 05 corriera, autobus extra-urbano; 06 autobus aziendale o scolastico; 07 auto privata (come conducente); 08 auto privata (come passeggero); 09 motocicletta, ciclomotore, scooter; 10 bicicletta; 11 altro mezzo; 12 a piedi;	1 prima delle 7,15; 2 dalle 7,15 alle 8,14; 3 dalle 8,15 alle 9,14; 4 dopo le 9,14;	1 fino a 15 minuti; 2 da 16 a 30 minuti; 3 da 31 a 60 minuti; 4 oltre 60 minuti;	Variabile di conteggio	Variabile di conteggio

Figura 14 Descrizione Campi del file ISTAT del pendolarismo

Nello specifico per la città di Torino:

Denominazione	Codice Provincia	Progressivo del comune	Codice Istat del Comune (formato alfanumerico)
Torino	001	272	001272

Figura 15 Codice ISTAT Comune di Torino

- Le matrici delle distanze sono suddivise per regione, tra queste è stata scelta la regione Piemonte. Così il file "*Piemonte.txt*" [14], contiene le informazioni relative alle distanze tra comuni piemontesi. Le matrici delle distanze sono state ottenute usando strumenti GIS e servendosi di un grafo stradale

commerciale. Gli elementi vettoriali utilizzati sono stati: i Centroidi dei comuni italiani al 2013 e il Grafo stradale MultiNet 2013 di TomTom. I centroidi dei comuni italiani sono stati ottenuti partendo dalla sezione di censimento che contiene il municipio. Il processo di calcolo è stato realizzato in condizioni ideali, cioè non considerando il traffico ma basandosi solo sulle velocità medie di percorrenza di ogni arco di strada costituente il grafo stradale utilizzato. Il file contiene le informazioni come indicate in Figura 16.

Name	Origine	Destinazione	Total_Minu	Total_Mete
Cod_comune di origine – Cod. comune di destinazione (es. 1042 – 76043)	Cod. comune di origine (es. 1042)	Cod. comune di destinazione (es. 76043)	Tempo di percorrenza in minuti	Tempo di percorrenza in metri

Figura 16 Struttura matrice ISTAT delle distanze

Software di gestione dei dataset

Per combinare ed elaborare i dati dell’ISTAT contenuti nei diversi file, si è scelto di usare il software KNIME Analytics Platform.

KNIME, è una piattaforma open source per la manipolazione e l’analisi dei dati, e contiene anche componenti di machine learning e data mining. La sua interfaccia grafica permette di assemblare i nodi per la pre-processazione (ETL: Extraction, Transformation, Loading), la modellazione, l’analisi e la visualizzazione dei dati.

Nella Figura 17, viene presentato il diagramma concettuale che corrisponde alla sequenza di passi necessari per analizzare i dati. Ogni passo è eseguito da un nodo e la sequenza di nodi costituisce quindi il flusso di lavoro. Quello che si desidera ottenere è il numero di lavoratori che arrivano nella città di Torino con un mezzo privato, partendo da una qualsiasi origine, e i relativi chilometri percorsi.

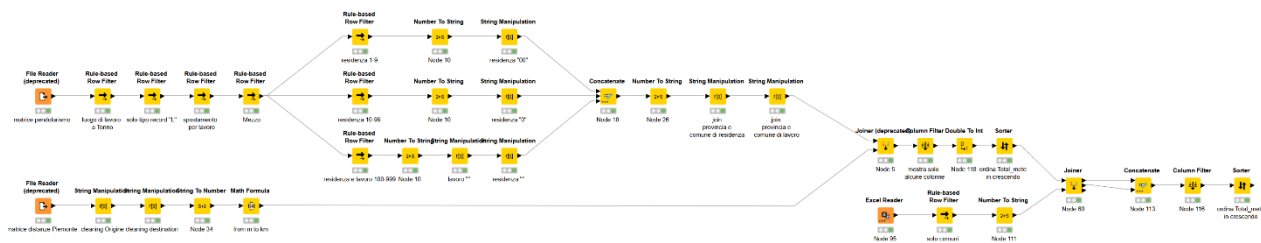


Figura 17 Workflow di KNIME

Il nodo “File Reader” legge il file .txt “matrice pendolarismo”. Tramite i nodi “Rule-Based Row filter” vengono applicati una serie di filtri alle righe, in successione:

- nella colonna “Provincia di studio o di lavoro” vengono tenute solo le righe che contengono gli spostamenti che hanno come destinazione la provincia di Torino e nella colonna “Comune di studio o di lavoro” solo il codice relativo al comune di Torino;
- nella colonna “tipo record” viene tenuto solo il record di tipo L;
- nella colonna “motivo dello spostamento” vengono tenute solo le righe in cui appare il valore “2” che corrisponde a uno spostamento per motivo di lavoro;
- nella colonna “Mezzo” vengono tenuti solo gli spostamenti con mezzo privato del quale si è il conducente (celle con valore “7”).

Arrivati a questo punto, emergono solamente gli spostamenti effettuati verso la città di Torino, per motivi di lavoro e con mezzo privato di cui la persona è il conducente.

Le tre serie di comandi successivi in parallelo hanno l'obiettivo di manipolare il contenuto delle colonne "comune di residenza" e "comune di studio o lavoro" in modo che il loro formato sia confrontabile con gli stessi dati contenuti nel database "matrice distanze Piemonte". In seguito, con i nodi "string manipulation" si uniscono le colonne "provincia di residenza" con "comune di residenza" e "provincia di studio o lavoro" con "comune di studio o lavoro", sempre per ottenere un codice identificativo per il luogo di origine e per il luogo di spostamento concorde in formato a quello dell'ISTAT, presente nel database "matrice distanze Piemonte".

Parallelamente un altro nodo, "File Reader", legge il file .txt "matrice distanze Piemonte". Con i nodi "string manipulation" si effettua una "pulizia" dei dati contenuti nelle colonne "origine" e "destinazione" (si elimina ",00"). Col nodo "String to number" si converte in numero double il formato dati della colonna "Total_Mete". Nel nodo "Math Formula" si cambia l'unità di misura dei valori nella colonna "Total_Mete" passando dai metri ai chilometri.

A questo punto, grazie al nodo "Joiner" vengono uniti i due set di dati (questo perché nel primo database sono contenute le informazioni sul numero degli spostamenti, mentre nel secondo le informazioni sulle distanze percorse). Con il nodo "column filter" si decide di mostrare solo le colonne utili (comune di residenza | comune di studio o di lavoro | sesso | orario di uscita | tempo impiegato | stima numero individui | total mete [km]). Nel nodo "Double to Int" si converte il valore "Total_Mete" in intero. Col nodo "Sorter" vengono ordinati i valori della colonna "Total Mete" in senso crescente.

Le distanze nulle sono attribuite agli spostamenti che hanno origine e destinazione coincidenti. Infatti, dato che il dataset originale dell'Istat considera solo le distanze tra i centroidi di due comuni, le distanze tra gli stessi centroidi vengono poste pari a zero. Non essendo possibile scendere nel dettaglio degli spostamenti intra comunali è stata presa la decisione di assegnare "casualmente" una distanza a tali tratte, ipotizzando che all'interno del proprio comune, le persone potrebbero percorrere una distanza che va da 1 km a "d" km (dove "d" è il diametro equivalente della città, paria 13 km per la città di Torino), nel caso "peggiore", arrivando all'altro capo della città.

Una volta ottenuti i km percorsi con le relative occorrenze, ne è stata fatta una cumulata, mostrata qui in Figura 18, che verrà inserita come input al modello su Matlab.

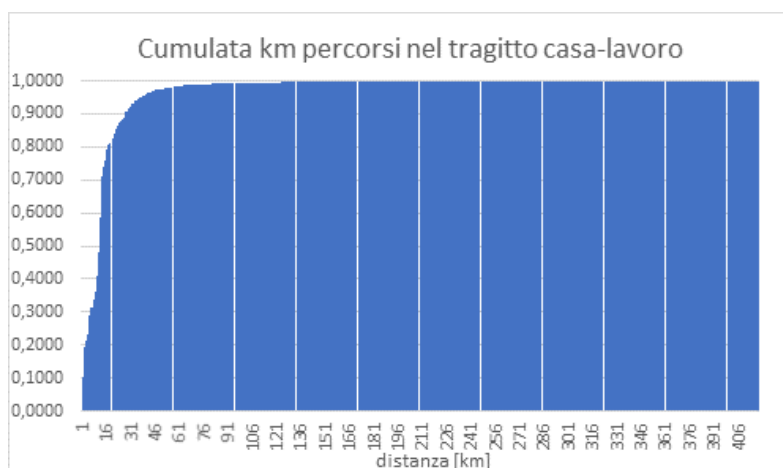


Figura 18 Cumulata dei km percorsi nel tragitto casa-lavoro

3.2 Modelli di auto elettriche in circolazione

Un'altra informazione utile da inserire nel codice è quella riguardante i modelli e le relative caratteristiche delle auto elettriche con cui i dipendenti possono arrivare al parcheggio aziendale. Per reperire queste informazioni, ci si è affidati alle statistiche dell'UNRAE; all'interno del loro sito web [15], nella sezione "Dati statistici", sotto la voce "Immatricolazioni", è reperibile la Classifica dei primi 10 modelli di autovetture e fuoristrada immatricolati in Italia, con il dettaglio per alimentazione del motore. Per lo scopo di questo lavoro, la ricerca si è focalizzata solo sulle autovetture BEV, quindi con guida pienamente elettrica e ricarica esterna della batteria. I dati relativi agli anni 2019, 2020 e 2021, riguardanti il numero di auto immatricolate, sono stati riassunti nella Tabella 1. Queste informazioni vengono ordinate partendo dal modello meno immatricolato a quello con più immatricolazioni, quindi da quello che ha una minor probabilità di essere trovato su strada a quello con probabilità maggiore. Il calcolo della frequenza cumulata relativa (V. Figura 19) sarà poi d'aiuto nel processo di selezione casuale delle auto che ogni giorno andranno a popolare il parcheggio.

Marca e Modello	Anno			Totale	Frequenza Cumulata Relativa
	2019	2020	2021		
<i>CITROEN czero</i>	54	-	-	54	0,000758992
<i>AUDI e-tron</i>	62	-	-	62	0,001630427
<i>CITROEN c4</i>	-	-	75	75	0,002684583
<i>FORD Mustang</i>	-	-	121	121	0,004385287
<i>TESLA model X</i>	228	34	-	262	0,008067803
<i>VOLKSWAGEN golf</i>	30	264	-	294	0,012200093
<i>TESLA model S</i>	252	48	-	300	0,016416715
<i>BMW i3</i>	487	-	-	487	0,022460539
<i>MINI MINI</i>	-	-	530	530	0,029305522
<i>VOLKSWAGEN ID.4</i>	-	-	1007	1007	0,036754888
<i>TESLA model Y</i>	-	-	1015	1015	0,045272464
<i>SMART forfour</i>	613	719	-	1332	0,063994265
<i>PEUGEOT 2008</i>	-	263	1655	1918	0,086721858
<i>OPEL corsa</i>	-	1135	1209	2344	0,1130898
<i>HYUNDAI kona</i>	347	1366	632	2345	0,143716531
<i>NISSAN leaf</i>	1258	994	820	3072	0,176676459
<i>PEUGEOT 208</i>	-	1603	1773	3376	0,21494933
<i>VOLKSWAGEN ID.3</i>	-	953	3023	3976	0,256244114
<i>DACIA SPRING</i>	-	-	4509	4509	0,299422323
<i>VOLKSWAGEN e-up!</i>	-	2837	2334	5171	0,353676192
<i>RENAULT twingo</i>	-	1094	5941	7035	0,424543551
<i>TESLA model 3</i>	1938	3278	4357	9573	0,559095956
<i>RENAULT zoe</i>	2177	5453	3479	11109	0,698483422
<i>SMART fortwo</i>	2357	3770	6180	12307	0,848651384
<i>FIAT 500</i>	-	2062	10748	12810	1

Tabella 1 Numero dei modelli di auto immatricolate negli anni 2019, 2020, 2021

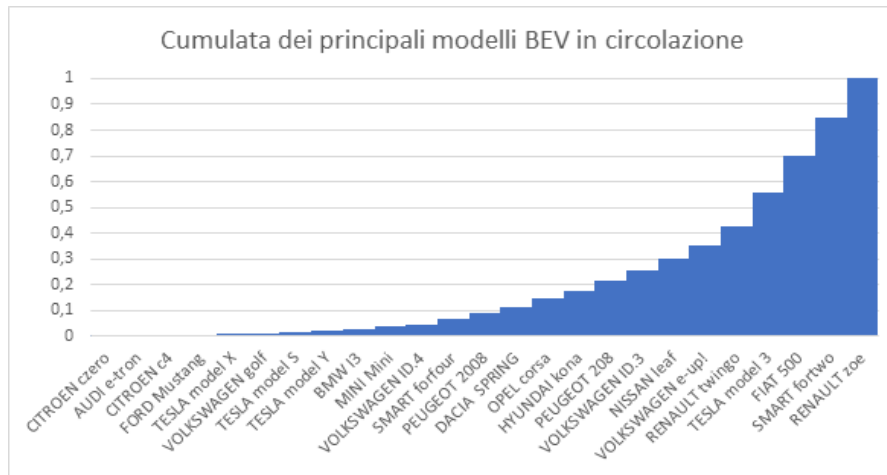


Figura 19 Cumulata dei principali BEV in circolazione negli anni 2019, 2020, 2021

Una volta ottenuti i modelli di auto, sono stati consultati i siti internet dei costruttori per reperire le caratteristiche tecniche di tali autovetture. L'esito di tale ricerca è mostrato nella Tabella 2.

Marca	Modello	Versione	Powertrain [CV]	Powertrain [kW]	Capacità batteria [kWh]	Consumo energetico [kWh/km]	Autonomia ciclo combinato (WLTP)	Riferimenti
FIAT	500	action	95	70	23,8	0,14-0,149	180	[16]
		icon/red/la prima	118	87	42	0,14-0,149	320	
SMART	EQ fortwo		82	60	17,6	0,152-0,16	125-135	[17]
	EQ forfour		82	60	17,6	0,163-0,2	120-130	
CITROËN	E-C4		136	100	50	0,2	350	[18]
	czero		67	49	16	0,126	150	[19]
NISSAN	Leaf	acenta/business/tekna/N-connecta	150	110	40	0,171	270	[20]
		e+Acenta/e+N-Connecta/e+Tekna	217	160	62	0,185	385	
PEUGEOT	208		136	100	50	0,153	340	[21]
	2008		136	100	50	0,159	340	
VOLKSWAGEN	e-UP!		83	61	18,7-32,3	0,127	257	[22]
	golf		136	100	24/36	0,154	300	[23]
	ID.3	pure performance, pro performance, pro s	150/204/204	110/150/150	45/58/77	0,15/0,15438/0,15759	348/425/554	[24]
	ID.4	pure performance, pro performance, GTX	170/204/299	125/150/220	52/77/77	0,16859/0,17219/0,18257	344/515/481	[25]
BMW	I3		170	125	37,9	0,163-0,153	285-308	[26]
AUDI	E-TRON	50 quattro	313	230	71	0,218	339	[27]
		55 quattro		300	95	0,223	437	
TESLA	MODEL 3		306/476/490	225/350/360	50/75	0,149/0,16/0,166	430/567/580	[28]
	Model X				100	0,22-0,23	580-547	[29]
	MODEL S		253-245	186-180	100	0,19-0,193	652-637	[30]
	MODEL Y	long range/performance	476/490	350/360	75	0,18-0,21	507/480	[31]
RENAULT	ZOE E-TECH	LIFE/BUSINESS	108	80	52	0,169-0,2	342-402	[32]
	ZOE E-TECH	ZEN/INTENSE	135	100	52	0,169-0,2	342-403	
	TWINGO	E-TECH ELECTRIC	82		22	0,16	190-270	[33]
OPEL	CORSA		136	100	50	0,159-0,176	329-337	[34]
HYUNDAI	KONA		136	100	39	0,143	305	[35]
	KONA		204	150	64	0,147	484	
DACIA	Spring	Comfort	45	33	27,4	0,146	230	[36]
MINI	Mini		184	135	32,6	0,152-0,158	226-234	[37]
FORD	Mustang Mach-E	standard range	269	198	76	0,172	440	[38]
		extended range	294	216	99	0,165	610	

Tabella 2 Caratteristiche tecniche dei modelli delle auto elettriche

Disponendo solo dell'informazione riguardante il numero di auto immatricolate per marca e modello e non avendo il dettaglio sulla versione; per tenere in considerazione il fatto che un modello di auto possa essere disponibile in più versioni di capacità di batteria, è stata assegnata la stessa probabilità a tutte le versioni. La scelta di una versione o di un'altra viene effettuata casualmente.

4 Caso studio: Risultati

In questo caso studio ci si pone nel contesto di un parcheggio aziendale, in cui l'azienda svolge il ruolo di BSP (o aggregatore) del parco di auto elettriche e, tramite di sistemi di ricarica bidirezionali, partecipa in qualità di UVAM al MSD, offrendo potenza che l'operatore del sistema di trasmissione potrà utilizzare per la regolazione terziaria e il servizio di bilanciamento. L'obiettivo è quello di simulare la partecipazione al Mercato e ottenere una risposta statistica delle possibilità remunerative, servendosi del software Matlab e applicando il metodo Monte Carlo²⁵.

4.1 Ipotesi

Il parcheggio aziendale è composto da 150 stalli equipaggiati con altrettante infrastrutture di ricarica bidirezionale modello Terra Nova 11J di ABB, con connettore di tipo CHAdeMO²⁶, che in modalità V2G prelevano 10kW con un rendimento $\eta_{V2G} = 96,5\%$ mentre in modalità G2V forniscono 11kW con rendimento $\eta_{G2V} = 94\%$. L'aggregato potrà quindi fornire alla rete al massimo 1,5 MW, valore superiore rispetto al minimo di offerta, pari a 1MW, per poter partecipare al servizio.

In modo da ottenere anche il corrispettivo fisso, e considerato che il parcheggio di tipo aziendale è occupato dalle 9 alle 18, si è deciso di partecipare all'approvvigionamento a termine per fornire servizi ancillari nel prodotto pomeridiano, che consente di fornire il servizio per tre ore, dalle 15 alle 18. Di fatto però, essendo lo scopo principale dell'auto quello di permettere gli spostamenti dei proprietari, è stato ipotizzato di garantire ai dipendenti uno stato di carica minimo alle 18 pari all'80%. Per questo motivo il servizio viene erogato per sole due ore, cosicché dalle 17 alle 18 ci sia del tempo utile a raggiungere tale stato di carica. Questo fatto comporterà la riduzione del corrispettivo fisso per una quota pari ai 2/3 del totale, come da regolamentazione, in quanto si fornirà il servizio solo per i 2/3 dell'intero periodo di fornitura.

Input

Lo stato di carica delle auto in partenza da casa al mattino, SOC_{casa} , è stato ottenuto estraendolo da una distribuzione gaussiana con valor medio $\mu = 95\%$ e varianza $\sigma^2 = 0,05$ utilizzando la funzione *randn*.

Lo stato di carica di ogni auto all'arrivo al parcheggio, SOC_{arrivo} , è una funzione dello stato di carica alla partenza e della distanza percorsa nel tragitto casa-lavoro:

$$SOC_{arrivo} = SOC_{casa} - \frac{\text{consumo} * km_{percorso}}{SOC_{casa} * \text{capacità}_{batteria}} \quad [18]$$

²⁵ Il metodo Monte Carlo viene utilizzato per riprodurre e risolvere numericamente un problema in cui sono coinvolte anche variabili aleatorie, e la cui soluzione analitica è troppo complessa o impossibile. Viene effettuato un numero N sufficientemente elevato di possibili combinazioni dei valori che le variabili di ingresso possono assumere e viene calcolato il relativo output sulla base delle equazioni del modello.

²⁶ è uno standard che permette la ricarica rapida in DC e lenta in AC

In questa formulazione, le caratteristiche del veicolo e la distanza da essa percorsa sono il risultato di un processo di creazione di “coppie” auto-distanza, descritto in seguito. A partire dai dati ottenuti tramite le elaborazioni descritte nei Capitoli 3.1 e 3.2, sono state prima selezionate le auto che popolano in parcheggio giornalmente, generando, con la funzione *rand*, un numero casuale r tra 0 e 1 e confrontando tale numero con tutti i valori c della cumulata: l’auto scelta sarà l’auto i -esima per cui $c(i - 1) < r \leq c(i)$. È stato di seguito selezionato il km percorso da tali auto, con lo stesso meccanismo di cui sopra, basato sulla generazione di un numero casuale r tra 0 e 1 e confrontando poi tale numero con tutti i valori c della cumulata, il km scelto sarà la distanza i -esima per cui $c(i - 1) < r \leq c(i)$. La creazione di coppie auto-distanza è stata fatta casualmente, ma controllando che il *km* assegnato consenta all’auto di arrivare al parcheggio con uno stato di carica non inferiore al 40%. L’introduzione di questo vincolo è stata dettata dalla volontà di impedire che l’utente arrivi a destinazione con un SOC residuo molto basso, tenendo in considerazione un minimo di programmazione fatta dall’utente stesso per non rischiare di arrivare a destinazione “a secco” e impedendo così la creazione di uno stato d’ansia, detto “*range anxiety*”, legato all’uso delle auto elettriche. Questo vincolo inoltre impedisce che la distanza assegnata all’auto sia incompatibile con la sua autonomia, cosa che invece si è notato capitare nelle simulazioni fatte prima della sua introduzione.

I seguenti dati sono stati ricavati da Terna e si riferiscono alla procedura di approvvigionamento a termine delle UVAM per il prodotto pomeridiano dell’area A (zona di mercato Nord):

- il premio medio ponderato, valore medio ponderato del premio di riserva delle quantità assegnate, è stato considerato pari a $3320 \frac{\text{€}}{\text{MW anno}}$

i valori di prezzi utilizzati nel modello sono i seguenti e rappresentano un valore medio delle offerte presentate:

$$\bar{P}_{MSD\uparrow}^{UVAM}(i) = 100 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

$$\bar{P}_{MSD\downarrow}^{UVAM}(i) = 30 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

$$P_{MB\uparrow}^{marg}(i) = 10 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

$$P_{MB\downarrow}^{marg}(i) = 10 \frac{\text{€}}{\text{MWh}}$$

4.2 Modello matematico

Il modello matematico creato su Matlab è pensato per essere modulare, è costituito da un ciclo *for*²⁷ interno in cui vengono generati giornalmente il numero di auto presenti nel parcheggio, la loro tipologia (all’interno di una funzione apposita) e il chilometro percorso per arrivare a destinazione (all’interno di un’altra funzione); viene simulata la partecipazione al MSD, generando dei valori soglia θ di probabilità di accettazione e di chiamata dell’offerta presentata, che vengono confrontati con i valori di probabilità ρ . In base all’esito di tale simulazione vengono calcolati, in due funzioni distinte, il compenso giornaliero variabile e quello fisso. Questo ciclo viene ripetuto per 22 volte, pari al numero medio di giorni in un mese.

Nel ciclo *for* interno viene inoltre generata la Baseline e tutti i dati necessari per il calcolo della remunerazione come l’energia misurata E_{mis} a partire dagli 8 time step precedenti l’inizio della fornitura del servizio, fino alla fine della stessa, e l’energia accettata E_{QMSD} su MSD da fornire in caso di attivazione del servizio.

²⁷ Il ciclo *for* è una struttura iterativa che permette di eseguire un gruppo di istruzioni un numero fissato di volte, indicate nella variabile di ciclo detta indice.

La simulazione Monte Carlo viene effettuata nel ciclo *for* più esterno, in cui viene simulato per 1000 volte un mese di partecipazione al Mercato e, al variare delle condizioni in ingresso, si ottiene una risposta statistica della remunerazione.

Nella Figura 20 viene presentato uno schema riassuntivo della struttura del modello.



Figura 20 Schema del modello matematico

4.3 Risultati: Confronto *Caso1* vs *Caso2*

In questa sezione viene presentato il confronto con un caso studio (d’ora in poi chiamato *Caso1*) precedente a questo (detto *Caso2*), esaminato nel lavoro di tesi “*Studio delle potenzialità del paradigma V2G nell’attuale contesto di mercato e normativo*” di M. Ristagno [16].

Il lavoro di tesi attuale dev’essere visto come la prosecuzione di quello citato sopra e, in particolare, questo confronto ha lo scopo di valutare l’impatto sulla remunerazione - derivante dalla partecipazione ai servizi ancillari - dell’introduzione di dati di ingresso descritti nelle sottosezioni 3.1 e 3.2.

Gli elementi distintivi del confronto consistono nella modalità di creazione di alcuni dati di ingresso e sono sintetizzati in Tabella 3.

	Caso 1	Caso 2
<i>Chilometri percorsi nel tragitto casa-lavoro</i>	Valori estratti casualmente con la funzione <i>randn</i> su Matlab (valore medio 11 km e deviazione standard 4)	Risultato dell’analisi descritta nella Sottosezione 3.1
<i>Tipologia di veicolo</i>	<i>Nissan Leaf e+</i> Capacità della batteria di 62 kWh, autonomia di 384 km e consumo medio di $0,17 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$	Molteplicità di modelli risultanti dall’analisi svolta nella Sottosezione 3.2
<i>Periodo fornitura servizio</i>	Dalle 15 alle 17. Per ottenere anche il corrispettivo fisso, è necessario approvvigionarsi per il <i>prodotto pomeridiano</i>	
<i>Probabilità di accettazione</i>	$p_{\text{accettazione}} = 0,5/0,75/1$	

Probabilità di chiamata

$$\rho_{chiamata} = 0,2/0,3/0,4$$

Tabella 3 Elementi distintivi del confronto tra Caso1 e Caso2

In prima battuta è stato preso in considerazione solo un giorno in cui l'offerta per la fornitura del servizio è stata chiamata e nella Figura 21 viene presentato il risultato di questo confronto.

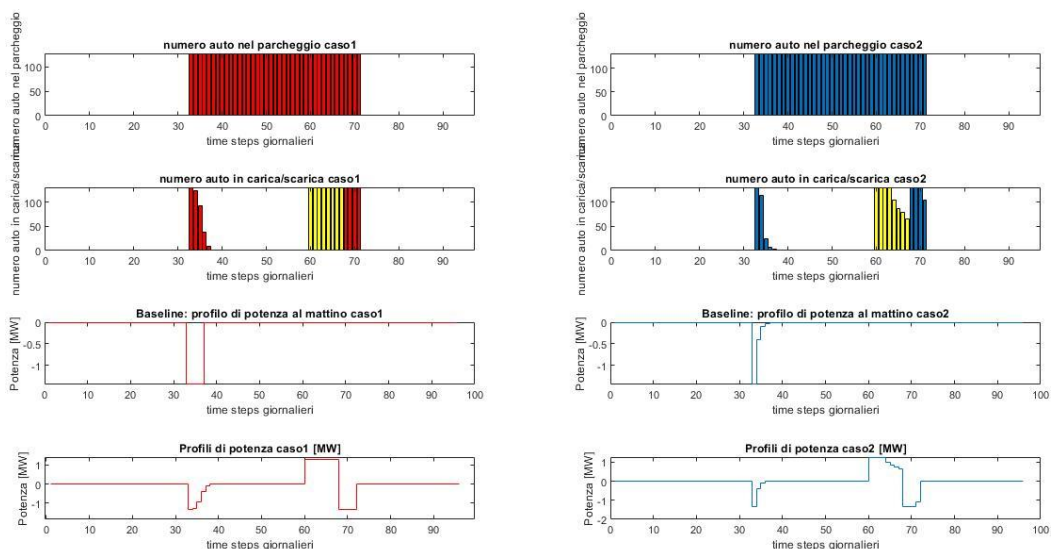


Figura 21 Confronto Caso1 vs Caso2

Nel primo gruppo di figure viene mostrato il numero di auto presente nel parcheggio in ogni intervallo di tempo quart'orario del giorno della simulazione.

Nel secondo gruppo di figure è mostrato il numero di auto connesse in modalità carica/scarica (in giallo) in ogni time step giornaliero. Al mattino, quando le auto arrivano al parcheggio, iniziano a ricaricarsi - per ristabilire il SOC unitario - alle 9:30 (time step n° 33). Il tempo impiegato da ogni auto è funzione dello stato di carica in arrivo al parcheggio, che a sua volta dipende dallo stato di carica in partenza da casa e dai km percorsi nel tragitto. È necessario poi precisare che è stato ipotizzato di garantire ai dipendenti dell'azienda un SOC minimo delle auto pari all'80% al termine della giornata lavorativa (alle 18, time step n° 71).

Durante la fornitura del servizio, dalle 15 alle 17 (rispettivamente time step n°60 e n°67), evidenziato dal colore giallo per entrambe le casistiche, si può notare che nel *Caso1*, il numero delle auto che immettono potenza in rete rimane costante per tutte e due le ore ed è proprio pari al totale di auto presenti nel parcheggio. Questo si può spiegare considerando il fatto che il parco auto è uniforme con caratteristiche di capacità di batteria sufficienti a fornire il servizio per l'intero periodo, riuscendo a soddisfare il requisito di restituire le auto all'utente al SOC minimo. Nel *Caso2* invece, il numero di veicoli connessi in modalità V2G è inferiore rispetto al totale presente nel parcheggio e diminuisce via via che ci si avvicina alla fine della fornitura del servizio. Questo si spiega considerando sia il vincolo sullo SOC minimo che l'ulteriore ipotesi introdotta nel *Caso2*, secondo la quale ai veicoli è impedito scaricarsi al di sotto del 35% del loro stato di carica.

La tipologia delle auto che non riescono a fornire il servizio continuamente per entrambe le ore, e che si devono "staccare" per via dei vincoli, sono quelle presentate in Tabella 4. **L'origine riferimento non è stata trovata.** Si può notare come le auto appartenenti a una fascia di capacità di

batteria ridotta (<18,7 kWh) sono quelle che riescono a fornire il servizio solo per un'ora, mentre le auto con capacità superiore ai 45kWh sono capaci di fornire servizi alla rete in modo completo.

Auto che non riescono a fornire V2G per tutte e 2 le ore				
	<i>Modello</i>	MWh	MWh/km	km
forniscono servizio solo 1 ora le auto con capacità<18,7 kWh	VOLKSWAGEN e-up!	0,0187	0,000127	160
	SMART fortwo	0,0176	0,000156	141
	SMART forfour	0,0176	0,000182	130
forniscono servizio 1 ora e 15 22kWh<capacità<23,8 kWh	FIAT 500	0,0238	0,000145	180
	RENAULT twingo	0,022	0,00016	190
forniscono servizio solo 1 ora e 30 27,4kWh<capacità<32,3kWh	VOLKSWAGEN e-up! Versione 32,3kWh	0,0323	0,000127	259
	DACIA SPRING	0,0274	0,000146	230
forniscono servizio solo 1 ora e 45 40kWh<capacità<42kWh	FIAT 500 versione 42kWh	0,042	0,000145	320
	NISSAN leaf	0,04	0,000171	389
forniscono servizio per 2 ore capacità>45kWh	TESLA model 3	0,05	0,000158	440
	HYUNDAI kona versione 64kWh	0,064	0,000147	484
	RENAULT zoe	0,052	0,000185	390
	PEUGEOT 2008	0,05	0,000159	340
	OPEL corsa	0,05	0,000167	337
	PEUGEOT 208	0,05	0,000153	340
	VOLKSWAGEN ID.3 versione 77kWh	0,077	0,000158	554
	TESLA model 3 versione 75kWh	0,075	0,00016	567
	BMW I3	0,071	0,000218	308
	NISSAN leaf versione 62kWh	0,062	0,000185	385
	VOLKSWAGEN ID.4 versione 77kWh	0,077	0,000172	515
	VOLKSWAGEN ID.3	0,045	0,00015	348

Tabella 4 Caratteristiche delle auto che forniscono servizio alla rete per vari time step

Nel terzo gruppo di figure della Figura 21 viene mostrato il profilo di potenza che il BSP è tenuto a comunicare all'operatore del sistema di trasmissione (Terna). Tale Baseline nei due casi è diversa perché è diversa l'ipotesi che sta alla base della sua creazione. Mentre per il *Caso1* è stato ipotizzato di comunicare un fabbisogno al mattino pari alla potenza necessaria per ricaricare le auto ipotizzando che partano tutte da un SOC pari all'85%, che comporta il fatto che tutte le auto impiegano 4 time step per ricaricarsi, nel *Caso2*, la Baseline è costruita sulla base del fabbisogno delle auto effettivamente connesse in modalità G2V al mattino.

Infine, nell'ultimo gruppo di figure è presentato il profilo in potenza giornaliero dell'intero aggregato, si possono distinguere i momenti in cui le auto sono connesse in modalità G2V (Potenza di segno negativo perché prelevata da rete); e quelli in cui sono connesse in modalità V2G in cui viene immessa potenza in rete (segno positivo).

Successivamente si sono confrontate le risposte statistiche sulla remunerazione ottenibile dalla partecipazione al servizio. In Figura 22 vengono presentati tre grafici, uno per ogni valore di probabilità di chiamata dell'offerta $\rho_{chiamata}$ pari a 0,2/0,3/0,4 che a loro volta presentano tre curve ognuna per un valore di probabilità di accettazione della stessa offerta $\rho_{accettazione}$ pari a 0,5/0,75/1. Per un valore di probabilità di chiamata viene mostrata la risposta statistica relativa all'ottenimento della remunerazione variabile a valle della simulazione Monte Carlo.

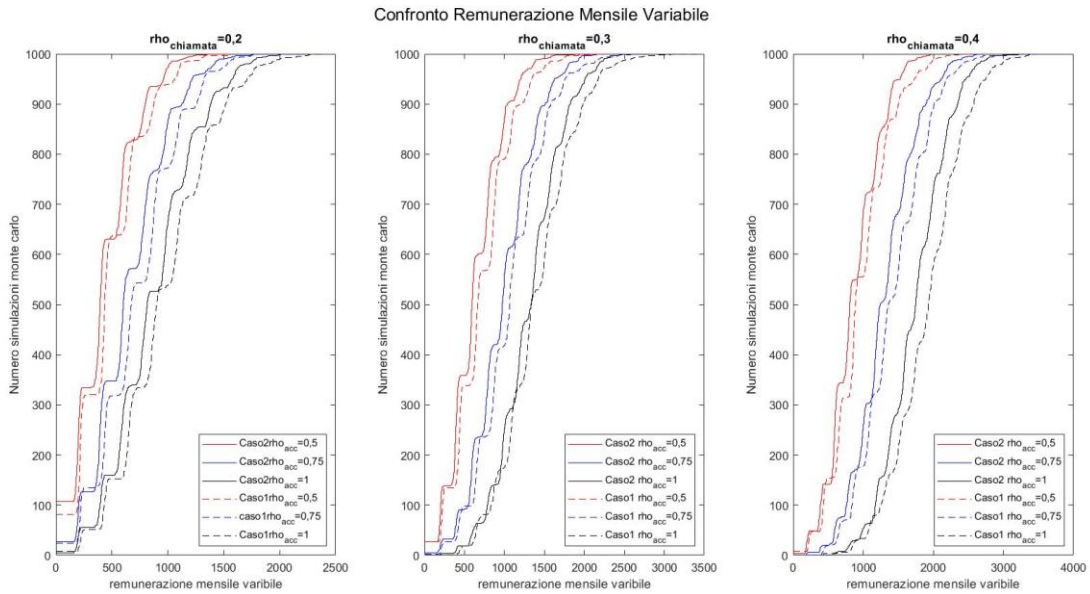


Figura 22 Confronto Ricezione Corrispettivo Variabile

Si può notare che, in ogni Caso, il valore del corrispettivo mensile variabile aumenta sia all'aumentare della probabilità di accettazione dell'offerta che di quella di chiamata.

Nelle tabelle sottostanti vengono riportati i valori di remunerazione corrispondenti ai percentili di ordine 25, 50, 75 e 100. Per percentile di ordine p si intende il dato che delimita il primo $p\%$ dei dati ordinati dai rimanenti dati.

25° percentile dei valori di remunerazione variabile mensile

	Caso 1			Caso2		
	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$
	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1
$\rho_{chiamata}$ 0,2	226€/MWh	438€/MWh	652€/MWh	202€/MWh	392€/MWh	593,5€/MWh
$\rho_{chiamata}$ 0,3	440€/MWh	819€/MWh	1082€/MWh	395€/MWh	744€/MWh	995,5€/MWh
$\rho_{chiamata}$ 0,4	652 €/MWh	1084€/MWh	1543€/MWh	587,5€/MWh	999€/MWh	1395,5€/MWh

Tabella 5 25° percentile

Risulta che, per $\rho_{accettazione} = 0,5$ e $\rho_{chiamata} = 0,2$, il 25% delle simulazioni presenta valori di remunerazione massima pari a 226€/MWh nel Caso1 e 202€/MWh nel Caso2. Per probabilità maggiori, ad esempio per $\rho_{accettazione} = 1$ e $\rho_{chiamata} = 0,4$, il 25% delle simulazioni presenta valori di remunerazione massima pari a 1543€/MWh nel Caso1 e 1395,5€/MWh nel Caso2.

Considerazioni analoghe possono essere fatte per i restanti valori percentili.

Mediana dei valori di remunerazione variabile mensile

	Caso 1			Caso2		
	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$
	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1
$\rho_{chiamata}$ 0,2	436€/MWh	663€/MWh	886€/MWh	396€/MWh	593,5€/MWh	808 €/MWh
$\rho_{chiamata}$ 0,3	674€/MWh	1064€/MWh	1361€/MWh	602€/MWh	974€/MWh	1244,5€/MWh
$\rho_{chiamata}$ 0,4	900€/MWh	1332€/MWh	1928€/MWh	815,5€/MWh	1334,5€/MWh	1747€/MWh

Tabella 6 50° percentile

Risulta che, per $\rho_{accettazione} = 0,5$ e $\rho_{chiamata} = 0,2$, il 50% delle simulazioni presenta valori di remunerazione massima pari a 436€/MWh nel Caso1 e 396€/MWh nel Caso2. Per probabilità maggiori, ad esempio per $\rho_{accettazione} = 1$ e $\rho_{chiamata} = 0,4$, il 50% delle simulazioni presenta valori di remunerazione massima pari a 1928€/MWh nel Caso1 e 1747€/MWh nel Caso2.

75° percentile dei valori di remunerazione variabile mensile

	Caso 1			Caso2		
	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$
	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1
$\rho_{chiamata}$ 0,2	653€/MWh	896€/MWh	1253€/MWh	593€/MWh	811€/MWh	1154€/MWh
$\rho_{chiamata}$ 0,3	908€/MWh	1322€/MWh	1743€/MWh	832€/MWh	1205,5€/MWh	1583,5€/MWh
$\rho_{chiamata}$ 0,4	1278€/MWh	1708€/MWh	2223€/MWh	1142€/MWh	1578,5€/MWh	2025€/MWh

Tabella 7 75° percentile

Risulta che, per $\rho_{accettazione} = 0,5$ e $\rho_{chiamata} = 0,2$, il 75% delle simulazioni presenta valori di remunerazione massima pari a 653€/MWh nel Caso1 e 593€/MWh nel Caso2. Per probabilità maggiori, ad esempio per $\rho_{accettazione} = 1$ e $\rho_{chiamata} = 0,4$, il 75% delle simulazioni presenta valori di remunerazione massima pari a 2223€/MWh nel Caso1 e 2025€/MWh nel Caso2.

Massimo dei valori di remunerazione variabile mensile

	Caso 1			Caso2		
	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$	$\rho_{accettazione}$
	0,5	0,75	1	0,5	0,75	1
$\rho_{chiamata}$ 0,2	1574€/MWh	2364€/MWh	2522€/MWh	1544€/MWh	2153€/MWh	1978€/MWh
$\rho_{chiamata}$ 0,3	2224€/MWh	2580€/MWh	3526€/MWh	1979€/MWh	2150 €/MWh	2746€/MWh
$\rho_{chiamata}$ 0,4	2412€/MWh	3440€/MWh	3456€/MWh	2192€/MWh	2813€/MWh	3261€/MWh

Tabella 8 100° percentile

Risulta che, per $\rho_{accettazione} = 0,5$ e $\rho_{chiamata} = 0,2$, il 100% delle simulazioni presenta valori di remunerazione massima pari a 1574€/MWh nel Caso1 e 1544€/MWh nel Caso2. Per probabilità maggiori, ad esempio per $\rho_{accettazione} = 1$ e $\rho_{chiamata} = 0,4$, il 100% delle simulazioni presenta valori di remunerazione massima pari a 3456€/MWh nel Caso1 e 3261€/MWh nel Caso2.

Il Caso2 presenta un valore di remunerazione variabile statisticamente inferiore, anche se di poco, rispetto al Caso1. Questo risultato rispecchia le considerazioni mostrate precedentemente sulla base della Figura 21 in cui veniva evidenziato come l'introduzione dei dati di input più aderenti alla realtà avessero un impatto negativo sul quantitativo di energia immesso in rete. Più l'aggregato non è in grado di fornire il servizio nelle due ore stabilite, meno sarà la remunerazione variabile in $\frac{\text{€}}{\text{MWh}}$ che può ottenere su base mensile in quanto essa è funzione dei MWh forniti.

Come mostrato in Figura 23 e riassunto in Tabella 9 all'aumentare della probabilità di accettazione aumenta la probabilità di ottenere il corrispettivo fisso; infatti, si vede che per una bassa probabilità di accettazione soltanto per 3 casi su 1000 si è ottenuto il corrispettivo fisso nel Caso 1 mentre per 1 caso su 1000 nel Caso2, per probabilità di accettazione pari a 0,75 invece la probabilità di ricevere il CFM sale al 22,3% nel Caso2 e al 18,9% nel Caso1, se tutte le offerte fossero conformi la ricezione del corrispettivo fisso si ha per il 93,2% delle simulazioni in entrambi i Casi.

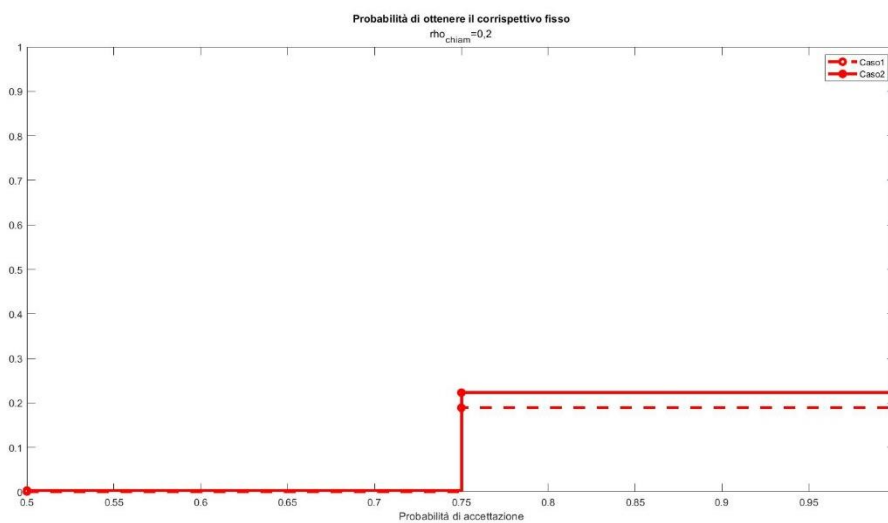


Figura 23 Probabilità di ricezione Corrispettivo Fisso

Probabilità di ricezione del Corrispettivo fisso mensile

$P_{accettazione}$	Caso1	Caso2
0,5	0,3%	0,1%
0,75	22,3%	18,9%
1	93,2%	93,2%

Tabella 9 Probabilità di ricezione del Corrispettivo fisso mensile

Viene presentata di seguito anche la risposta statistica del CFM per un unico valore di probabilità di chiamata al variare della probabilità di accettazione delle offerte. Si ricorda che la ricezione del corrispettivo fisso non dipende dalla probabilità che l'offerta venga chiamata ma solo che questa sia conforme alla quantità offerta in fase d'asta.

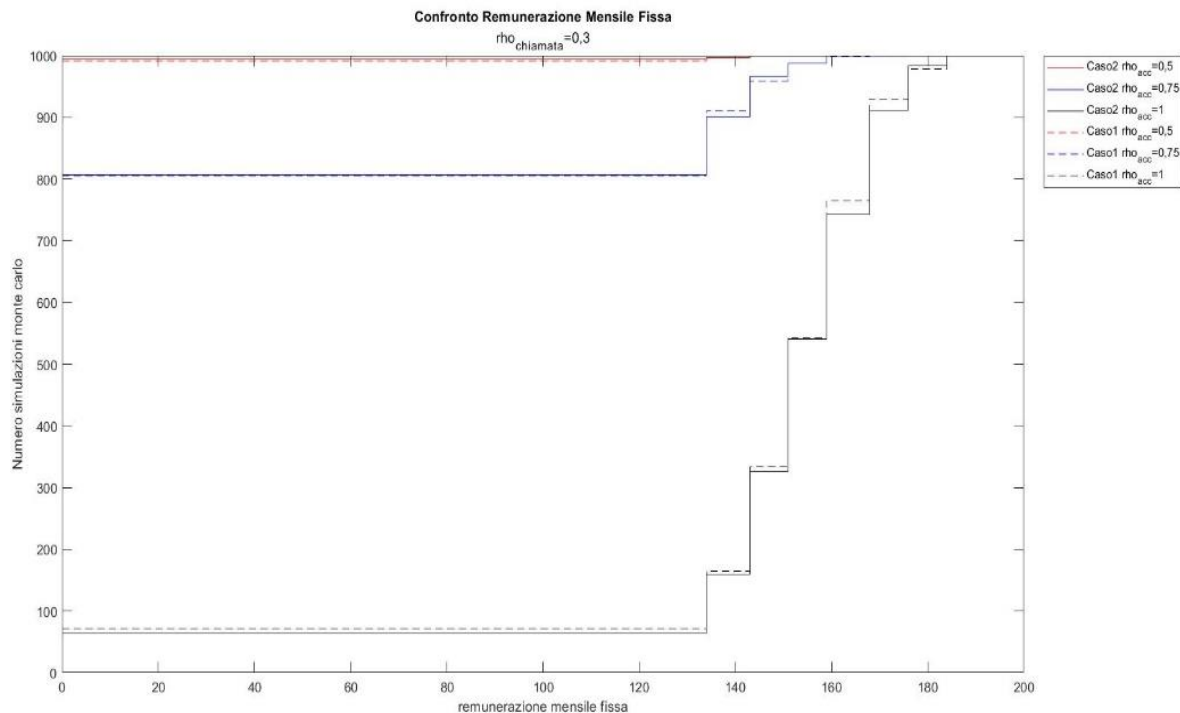


Figura 25 Risposta statistica ricezione Corrispettivo fisso mensile

5 Conclusioni e sviluppi futuri

L'obiettivo della presente tesi, svolta in collaborazione con l'azienda Edison S.p.A. è stato quello di effettuare un'analisi per valutare la remunerazione ottenibile dalla partecipazione di un UVAM al Mercato dei Servizi di Dispacciamento. In particolare, è stato analizzato nel dettaglio l'impatto che le caratteristiche tecniche dei veicoli (in termini di capacità della batteria e autonomia) e le abitudini degli utenti possono avere sulla remunerazione fissa e variabile.

Analogamente ai risultati di un precedente studio [16], si è confermato il fatto che nonostante la remunerazione fissa sia stata introdotta per incentivare la partecipazione delle UVAM al Mercato, essa assume statisticamente un valore basso, un ordine di grandezza inferiore di quella variabile. Questo è dovuto in gran parte alla penalità derivante dal fatto che l'aggregato ha effettivamente fornito il servizio per un lasso di tempo inferiore a quello previsto dal prodotto pomeridiano. A questo si aggiunge l'incertezza legata alla ricezione del CFM poiché viene attribuito solo se le offerte sono state accettate per più del 70% dei giorni disponibili del mese. Infatti, dalla Tabella 9 si nota che anche per un valore di probabilità di accettazione delle offerte unitaria, la probabilità di ricezione del corrispettivo fisso non è pari al 100%. Vista la limitazione derivante dall'aver un intervallo temporale fisso in cui fornire il servizio per ottenere il CF, sarebbe interessante svincolarsi dalla volontà di approvvigionarsi a termine. A questo scopo uno spunto per un lavoro futuro potrebbe essere quello di fare un'analisi approfondita del mercato per trovare i momenti migliori per fornire il servizio, dove per migliori si intendono quelli in cui c'è la maggior probabilità di chiamata.

Un altro possibile sviluppo è quello di estendere l'analisi ad altri tipi di parcheggi con altre funzioni, orari e modi di utilizzo, come i parcheggi pubblici, di interscambio, di centri commerciali, aeroporti eccetera.

Un ulteriore approfondimento può essere fatto per valutare l'influenza della comunicazione della baseline da parte dell'aggregatore, sulla possibilità di ottenere la piena remunerazione variabile, studiando una strategia di ottimizzazione della remunerazione ottenibile.

6 Bibliografia

- [1] World Meteorological Organization, [Online]. Available: <https://public.wmo.int/en>.
- [2] IPCC, «Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,» Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), Geneva, Switzerland, 2014.
- [3] S. D. Q. M. M. Z. C. M. M. K. A. M. a. H. M. (. [Solomon, «Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing,» in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*, Cambridge University Press, 2007.
- [4] W. M. Organization, «State of the Global Climate 2020,» 2021.
- [5] N. Armaroli, Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica, Matematica e Scienze Naturali, vol. I, Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, 2020, pp. 251-260.
- [6] K. K. Barry D. Solomon, «The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook,» *Energy Policy*, vol. 39, n. 11, pp. 7422-7431, 2011.
- [7] E. Commission, *CO₂ emission performance standards for cars and vans*.
- [8] cdp, EY, Luiss Business School, «Settore Automotive e Covid-19. Scenario, impatti e prospettive,» 2020.
- [9] MISE, «ecobonus. L'incentivo per la mobilità sostenibile,» [Online]. Available: <https://ecobonus.mise.gov.it/>.
- [10] evway, «Mappa europea con le colonnine di ricarica pubbliche per auto elettriche,» [Online].
] Available: <https://evway.net/mappa/>.
- [11] Terna, «CODICE DI RETE ITALIANO,» [Online]. Available: <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/codici-rete/codice-rete-italiano>.
- [12] ARERA, *Delibera 05 maggio 2017 300/2017/R/eel*.
]
- [13] ISTAT, «Matrici del pendolarismo,» [Online]. Available: <https://www.istat.it/it/archivio/139381>.
]
- [14] ISTAT, «Matrici delle distanze,» [Online]. Available: <https://www.istat.it/it/archivio/157423>.
]
- [15] UNRAE, «DATI STATISTICI,» [Online]. Available: <http://www.unrae.it/dati-statistici/immatricolazioni>.
]

- [16 M. Ristagno, «Studio delle potenzialità del paradigma V2G nell'attuale contesto di mercato e
] normativo,» 2021.
- [17 ANFIA, «STUDI E STATISTICHE,» [Online]. Available: <https://www.anfia.it/it/automobile-in-cifre/statistiche-italia/immatricolazioni>.
- [18 R. B. D'Agostino e M. A. Stephens, *Goodness of Fit Techniques* Vol.68, New York: Marcel Dekker, Inc.
]
- [19 International Energy Agency, «Key World Energy Statistics,» 2021.
]
- [20 International Energy Agency, «Special Report World Energy Outlook: Energy and Air Pollution,» 2016.
]
- [21 E. Bompard, «The «electricity triangle»: a possible solution to the «energy trilemma»,» in *XII lezione della Siena Advanced School on Sustainable Development*.
- [22 World energy Council, «World energy Trilemma Index,» 2021.
]
- [23 International Energy Agency, *Total Final Consumption by sector, World 1990-2019*.
]
- [24 Volkswagen Group of America, «Basics of Electric Vehicles».
]
- [25 Gestore dei Mercati Energetici, «GME Gestore Mercati Energetici,» [Online]. Available:
] <https://www.mercatoelettrico.org/it/default.aspx>.
- [26 M. Falchetta, «Fonti Rinnovabili e Rete Elettrica: Considerazioni di base e scenari di evoluzione delle
] fonti rinnovabili elettriche in Italia,» 2014.
- [27 K. C. K. P. Lauren Dunlap, «Resources for the future,» Marzo 2020. [Online]. Available:
] <https://www.rff.org/>.
- [28 C. ISO. [Online]. Available:
] <http://www.caiso.com/market/Pages/ReportsBulletins/RenewablesReporting.aspx>.
- [29 World Energy Council, «Italy Energy Trilemma Index,» 2021.
]
- [30 Smart, «Dati tecnici smart EQ,» [Online]. Available: <https://www.smart.mercedes-benz.com/it/it/node/1119>.
- [31 Fiat, [Online]. Available: <https://www.fiat.it/500-elettrica>.
]
- [32 Citroën, «Citroën ë-C4 Elettrica,» [Online]. Available: <https://www.citroen.it/modelli/gamma-citroen/c4/e-c4.html>.

- [33 Quattroruote, «Citroën C-Zero,» [Online]. Available: <https://www.quattroruote.it/tutte-le-auto/citroen/c-zero>.
- [34 Nissan, «Nissan Leaf - Listino Versioni e Specifiche,» [Online]. Available: <https://www.nissan.it/veicoli/veicoli-nuovi/leaf/specifiche-prezzo.html>.
- [35 Peugeot, «Gamma Elettrica Peugeot,» [Online]. Available: <https://www.peugeot.it/gamma-modelli/gamma/elettriche-peugeot.html>.
- [36 Quattroruote, [Online]. Available: https://www.quattroruote.it/news/nuovi-modelli/2019/09/05/volkswagen_e_up_prezzo_autonomia_batteria_uscita.html.
- [37 Quattroruote, [Online]. Available: <https://www.quattroruote.it/tutte-le-auto/volkswagen/e-golf>.
- [38 Volkswagen, [Online]. Available: <https://www.volkswagen.it/it/modelli/id3.html?---=%7B%22filter-service%22%3A%22%2F%3FengineType%3DElettrico%22%7D>.
- [39 Volkswagen, [Online]. Available: https://www.volkswagen.it/it/configuratore.html/__app/id-4.app?---=%7B%22filter-service%22%3A%22%2F%3FengineType%3DElettrico%22%7D.
- [40 BMW, [Online]. Available: <https://www.bmw.it/it/gamma/bmw-i/i3/2021/bmw-i3-dati-tecnici.BMW-i3-120Ah.html>.
- [41 Audi, [Online]. Available: <https://www.audi.it/it/web/it/modelli.html?bycarlinegroup=full-electric>.
- [42 Tesla, [Online]. Available: https://www.tesla.com/it_it/model3.
- [43 Tesla, [Online]. Available: https://www.tesla.com/it_IT/modelx/design#overview.
- [44 Tesla, [Online]. Available: https://www.tesla.com/it_it/models.
- [45 Tesla, [Online]. Available: https://www.tesla.com/it_it/modely.
- [46 Renault, «Renault Zoe E-Tech,» [Online]. Available: <https://cdn.group.renault.com/ren/it/transversal-assets/brochures/X102VEVPZOE/brochure.pdf>.
- [47 Renault, [Online]. Available: <https://www.renault.it/veicoli-elettrici-ibridi/twingo-electric/autonomia-ricarica.html>.
- [48 Opel, «Brochure e listini - Opel Corsa-e,» [Online]. Available: <https://www.opel.it/veicoli/corsa-models/corsa-e/download.html>.
- [49 Hyundai, «Caratteristiche Tecniche NUOVA HYUNDAI KONA Elettrica,» [Online]. Available: <https://s7g10.scene7.com/is/content/hyundai/autoveer/Scheda+Tecnica+Nuova+Hyundai+Kona+Electric.pdf>.

[50 Dacia, «Nuova Dacia Spring,» [Online]. Available: <https://cdn.group.renault.com/dac/it/transversal-assets/brochures/XBG1VEVPS1E/brochure.pdf.asset.pdf/5d8054d981.pdf>.

[51 Mini, [Online]. Available: https://www.mini.it/it_IT/home/range/electric/peace-of-mind.html.
]

[52 Ford, [Online]. Available: <https://www.ford.it/guida-allacquisto/scegli-la-tua-ford/configura-mach-e/configura#/model?catalogId=WAEIX-CGW-2022-Mach-EITA202225&>.