



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica E Nucleare

Classe **LM 30** (DM 270)

A.a. 2024/2025

Sessione di Laurea marzo 2025

Analisi di scenario comparativa – Total Cost of Ownership

Relatore:

Prof. Davide Papurello

Candidato:

Donato De Natale

ABSTRACT

Negli ultimi anni si è sentita l'esigenza di sviluppare un nuovo modello di mobilità sostenibile per contrastare il cambiamento climatico e l'inquinamento atmosferico dovuto ai trasporti. All'interno del Green Deal, il principale riferimento normativo Europeo, il pacchetto Fit for 55 rappresenta un programma per ottenere la riduzione del 55% delle emissioni, entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990. L'oggetto di studio è l'auto elettrica a batteria che, grazie ai suoi aspetti costruttivi, consente di azzerare le emissioni di anidride carbonica prodotte localmente. L'obiettivo di questo elaborato è la creazione di un modello di calcolo del costo totale di proprietà per analizzare la convenienza dei veicoli alternativi rispetto ai veicoli tradizionali presi in esame. Nella seconda parte dell'elaborato è stata condotta un'analisi di scenario comparativa basata sulla penetrazione dei veicoli elettrici all'interno del parco veicolare in Italia. Si sono considerati tre possibili sviluppi futuri, pessimistico, conservativo e ottimistico, che differiscono per il numero totale di veicoli elettrici immatricolati, con considerazioni dal punto di vista energetico ed economico. Nell'analisi si è tenuto conto delle normative di riferimento e di vincoli reali, come la produzione di energia e la presenza di un'infrastruttura di ricarica capillare sul territorio. Infine, sono stati formulati suggerimenti e opportunità di miglioramento tecnologico, anche sulla base del modello norvegese, per completare la transizione energetica entro i termini stabiliti.

Sommario

ABSTRACT	2
INDICE DELLE FIGURE.....	5
INDICE DELLE TABELLE.....	8
INDICE DELLE SIGLE.....	10
INTRODUZIONE	12
CAPITOLO 1: LA MOBILITA'	14
1.1 La mobilità tra passato e presente.....	14
1.2 Classificazione per segmenti	17
1.3 Classificazione per tipologia di propulsione.....	18
1.3.1 Veicoli tradizionali	18
1.3.2 Veicoli alternativi	20
CAPITOLO 2: LE AUTO ELETTRICHE	25
2.1 Caratteristiche principali.....	25
2.2 Infrastrutture di ricarica	27
2.3 Normative di riferimento	28
2.4 Rischio incendio	32
2.5 Confronto con Paesi Europei	35
2.6 Il caso norvegese.....	38
CAPITOLO 3: METODOLOGIE	43
3.1 Analisi della letteratura	43
3.2 Formulazione del modello	46
3.2.1 CAPEX.....	47
3.2.2 OPEX	49
3.2.3 Extra	52
3.2.4 Interessi	53
3.2.5 Valore residuo.....	53
3.3 Attualizzazione dei costi	54
CAPITOLO 4: SVILUPPO DELLE METODOLOGIE.....	55
4.1 I veicoli in esame	55
4.2 Condizioni al contorno.....	58
4.3 Calcolo del TCO	64
4.4 Calcolo dell'Incidenza	66

4.5 Analisi di sensitività.....	71
4.5.1 Variazione dello scenario di ricarica	71
4.5.2 Variazione dell'incentivo.....	73
CAPITOLO 5: MODELLAZIONE DEGLI SCENARI.....	76
5.1 Analisi del dataset	77
5.2 Scenario pessimistico.....	83
5.3 Scenario conservativo	87
5.4 Scenario ottimistico	92
5.5 Confronto fra scenari	98
CAPITOLO 6: PROPOSTA DI UN MODELLO PER IL RAGGIUNGIMENTO DEL TARGET NEL 2030	101
6.1 Produzione	102
6.2 Infrastrutture	104
6.2.1 Colonnine	104
6.2.2 Battery swap.....	105
6.2.3 Infrastrutture a ricarica solare	106
6.3 Vehicle grid interaction	107
6.3.1 V2G	108
6.3.2 V2H	109
6.3.3 V2L.....	110
6.4 Modello su ETM.....	110
6.4.1 Definizione degli input.....	111
6.4.2 Visualizzazione degli Output.....	115
CONCLUSIONI	120
Appendice A	122
Appendice B	124
Appendice C	125
Appendice D	126
Bibliografia.....	127

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Rappresentazione dei settori gestiti dal pacchetto Fit for 55 [1].....	12
Figura 2: Rappresentazione del numero di automobili ogni 1000 abitanti [3].....	15
Figura 3: Rappresentazione dell'età media dei veicoli in Europa [3]	16
Figura 4: Istogramma rappresentante il parco veicolare in Italia [3]	16
Figura 5: Diagramma a torta rappresentante le tipologie di alimentazione in Italia [3].....	17
Figura 6: Schema di funzionamento di un MHEV [6]	21
Figura 7: Schema di funzionamento di un HEV [7]	22
Figura 8: Schema di funzionamento di un PHEV [8].....	22
Figura 9: Confronto tra schemi di funzionamento tecnologia e-POWER vs Hybrid [9]	23
Figura 10: Rappresentazione della componentistica della Toyota Mirai [10].....	24
Figura 11: Struttura batteria agli ioni di litio di un'auto elettrica VW ID [11].....	26
Figura 12: Infrastruttura di ricarica domestica Wallbox [12]	27
Figura 13: Distribuzione delle IdR sul territorio nazionale [14]	28
Figura 14: Rappresentazione delle normative di riferimento nei diversi ambiti [15]	29
Figura 15: Rappresentazione schema di ricarica Modo 1 [18].....	31
Figura 16: Rappresentazione schema di ricarica Modo 2 [18].....	31
Figura 17: Rappresentazione schema di ricarica Modo 3 [18].....	31
Figura 18: Rappresentazione schema di ricarica Modo 4 [18].....	31
Figura 19: Rappresentazione dei Connettori di ricarica nelle diverse aree geografiche [15]	32
Figura 20: Istogramma rappresentante il numero di incendi ogni 100.000 auto per tipologia di trazione [21].....	34
Figura 21: Grafico a torta rappresentante la percentuale di incendi per tipologia di trazione sul totale [21].....	34
Figura 22:Grafico a barre rappresentante il confronto delle immatricolazioni percentuali BEV [22].....	35
Figura 23: Distribuzione delle infrastrutture di ricarica sul territorio europeo [23].....	37
Figura 24: Grafico a torta rappresentante le Immatricolazioni in Norvegia nel 2024 [24].	39
Figura 25: Diagramma raffigurante lo sviluppo del parco auto norvegese nel periodo 2010- 2024 [25]	40
Figura 26: Auto più venduta in Norvegia - Tesla Model Y [29].....	42
Figura 27: Segmento A: Hyundai i10, Fiat Panda, Dacia Spring [42]	56
Figura 28: Segmento B: Renault Clio, Toyota Yaris, Peugeot e-208 [42].....	56
Figura 29: Segmento C: Volkswagen Golf, Peugeot 308, Volkswagen ID.3 [42].....	57
Figura 30: Segmento D: Alfa Romeo Giulia, Mercedes C, Tesla Model 3 [42].....	57
Figura 31: Segmento E: Mercedes E, Audi A6, BMW Serie 5, Toyota Mirai [42]	57

Figura 32: Diagramma a barre rappresentante il CAPEX riportato in Tabella 13.....	60
Figura 33: Diagramma a torta che indica la tipologia di percorso considerato	61
Figura 34: Rappresentazione dello scenario di ricarica nel caso studio	61
Figura 35: Rappresentazione degli OPEX riportati in Tabella 14	63
Figura 36: Rappresentazione del TCO su istogramma in funzione della tipologia di trazione.	66
Figura 37: Rappresentazione dei singoli contributi nel calcolo del TCO	71
Figura 38: Analisi di sensitività - variazione del TCO dei BEV in funzione dello scenario di ricarica adottato	73
Figura 39: Analisi di sensitività – variazione del TCO dei BEV in funzione degli incentivi	74
Figura 40: Curva di crescita riferita alla numerosità dei punti di ricarica nel periodo 2014- 2024	78
Figura 41: Rappresentazione dell’evoluzione del prezzo delle batterie nel periodo 2014- 2024 [50]	78
Figura 42: Rappresentazione del miglioramento dell’autonomia media dei BEV in Europa [51]	79
Figura 43: Rappresentazione dei modelli in vendita sul mercato in funzione dell'autonomia [51]	80
Figura 44: Rappresentazione numero di modelli disponibili sul mercato europeo in funzione dell’anno di riferimento [51]	81
Figura 45: Andamento della capacità media delle batterie.....	82
Figura 46: Vendite BEV in Italia (2014-2024)	82
Figura 47: Rappresentazione del modello impiegato nell’analisi dello scenario pessimistico	84
Figura 48: Rappresentazione nel diagramma a barre del TCO - Caso base (2024) vs Scenario Pessimistico (2029).....	86
Figura 49: Rappresentazione del costo delle batterie (2019-2030) [50]	87
Figura 50: Calcolo del numero di punti di ricarica negli anni futuri dello scenario BAU secondo regressione.....	88
Figura 51: Calcolo dell’autonomia negli anni dello scenario conservativo secondo regressione	88
Figura 52: Rappresentazione del modello impiegato per l’analisi dello scenario conservativo.....	90
Figura 53: Rappresentazione nel diagramma a barre del TCO - Caso Base (2024) vs Scenario Conservativo (2029)	92

Figura 54: Rappresentazione del modello impiegato nell'analisi dello scenario ottimistico	94
Figura 55: Rappresentazione nel diagramma a barre del TCO - Caso Base (2024) vs Scenario Ottimistico (2029).....	97
Figura 56: Rappresentazione dell'andamento delle nuove immatricolazioni di BEV nei diversi scenari	99
Figura 57: Rappresentazione nel diagramma a barre del TCO calcolato con riferimento alla Tabella 39	100
Figura 58: Rappresentazione della richiesta energetica nello scenario base (2024) vs scenario ottimistico (2030)	101
Figura 59: Rappresentazione delle FER protagoniste della transizione energetica al 2030 [61]	104
Figura 60: Infrastrutture di ricarica TESLA [62].....	105
Figura 61: Rappresentazione di una Power Swap Station 4.0 Nio [64]	106
Figura 62: Infrastruttura a ricarica solare [65].....	107
Figura 63: Rappresentazione del funzionamento di ricarica secondo il V2G [66]	108
Figura 64: Raffigurazione dello schema di funzionamento secondo il V2H [68].....	109
Figura 65: Rappresentazione dello schema di funzionamento secondo il V2L [69]	110
Figura 66: Output del modello calcolati dal software ETM all'anno di riferimento.....	111
Figura 67: Schede presenti sul software per modificare i parametri di input del modello	111
Figura 68: Definizione della percentuale delle diverse tecnologie veicolari all'anno 2030	112
Figura 69: Definizione della potenza installata per la produzione da FER	113
Figura 70: Definizione delle dimensioni e della tipologia di storage all'anno 2030.....	114
Figura 71: Confronto dei livelli di emissione tra l'anno di riferimento (2019) e l'anno del modello (2030)	114
Figura 72: Output del modello calcolati dal software ETM all'anno 2030.....	115
Figura 73: Domanda energetica per le auto in funzione della tecnologia veicolare.....	115
Figura 74: Emissioni in funzione dell'anno di riferimento - da sinistra verso destra rispettivamente anno 1990, anno 2019, anno 2030	116
Figura 75: Produzione e domanda oraria di energia elettrica all'anno 2030.....	117
Figura 76: Confronto produzione di elettricità - anno corrente (2019) e anno del modello (2030)	118
Figura 77: Output modello con riduzione di produzione da centrali a gas - anno 2030 ...	119

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Dati relativi al Rischio incendio [21].....	33
Tabella 2: Nuove immatricolazioni BEV nei Paesi Europei	36
Tabella 3: Percentuale di BEV sul totale del parco auto circolante [3]	38
Tabella 4: Panoramica dei contributi sul territorio italiano	44
Tabella 5: Tipologia di trazione considerata [33]	45
Tabella 6: Tipologia di modello adottato	46
Tabella 7: Costi considerati in letteratura	46
Tabella 8: Incentivi in funzione delle emissioni e dell'ISEE [34]	48
Tabella 9: Tariffe carburanti riferite all'anno 2024 espresso in [€/l] o [€/kg] [39]	51
Tabella 10: Tariffe di ricarica [€/kWh] in funzione dello scenario di ricarica [39]	51
Tabella 11: Elenco dei veicoli in esame nel caso studio [42]	56
Tabella 12: Elenco delle caratteristiche tecniche di ciascun autoveicolo [42]	58
Tabella 13: Calcolo del CAPEX per ciascun autoveicolo usando l'equazione (2)	59
Tabella 14: Calcolo degli OPEX secondo l'equazione (6)	62
Tabella 15: Calcolo del Valore Residuo secondo le statistiche per ciascun modello	64
Tabella 16: Calcolo del TCO per i modelli in esame secondo l'equazione (10)	65
Tabella 17: Calcolo dell'incidenza del prezzo di acquisto sul totale del TCO secondo equazione (13)	67
Tabella 18: Calcolo dell'incidenza del CAPEX sul TCO per ciascun veicolo	68
Tabella 19: Calcolo dell'incidenza degli OPEX sul TCO per ciascun veicolo	69
Tabella 20: Calcolo dell'incidenza dei costi Extra sul TCO per ciascun veicolo	70
Tabella 21: Analisi di sensitività - variazione del TCO dei BEV in funzione dello scenario di ricarica adottato	72
Tabella 22: Analisi di sensitività -variazione del TCO dei BEV in funzione dell'incentivo	74
Tabella 23: Elenco delle grandezze di riferimento nel dataset storico [49]	77
Tabella 24: Caratteristiche principali di mercato per i BEV di riferimento nel territorio europeo [51]	81
Tabella 25: Ipotesi della variazione delle variabili indipendenti per lo Scenario Pessimistico	83
Tabella 26: Elenco delle immatricolazioni previste dal modello impiegato nello Scenario Pessimistico	84
Tabella 27: Variazione dei principali costi nello Scenario Pessimistico in funzione delle ipotesi precedenti	85
Tabella 28: Variazione del TCO nello Scenario Pessimistico rispetto al caso base	85
Tabella 29: Previsioni delle variabili indipendenti nello scenario conservativo per il periodo 2025-2029	89

Tabella 30: Immatricolazioni previste secondo lo scenario conservativo per il periodo 2025-2029	90
Tabella 31: Calcolo della variazione dei principali costi nello scenario conservativo	91
Tabella 32: Calcolo della variazione del TCO nello scenario conservativo	91
Tabella 33: Calcolo delle immatricolazioni previste dal modello nello scenario ottimistico	95
Tabella 34: Calcolo della variazione dei singoli contributi sul CAPEX nello scenario ottimistico	96
Tabella 35: Calcolo della variazione degli OPEX nello scenario ottimistico.....	96
Tabella 36: Calcolo della variazione del TCO nello scenario ottimistico	97
Tabella 37: Confronto delle nuove immatricolazioni ottenute dai modelli nei vari scenari (2024-2029)	98
Tabella 38: Confronto delle immatricolazioni totali previste dai vari modelli nei diversi scenari all'anno 2029.....	98
Tabella 39: Confronto del valore calcolato del TCO nei diversi scenari di riferimento.....	99
Tabella 40: Calcolo della richiesta energetica al 2030 in funzione del numero di veicoli BEV e PHEV.....	102
Tabella 41: Calcolo della richiesta energetica totale al 2024 e al 2030	102
Tabella 42: Calcolo dell'energia richiesta da ciascun veicolo di tipo BEV e PHEV	102
Tabella 43: Obiettivi di crescita della potenza da fonte rinnovabile al 2030 (MW) [Fonte: RSE, GSE, Terna]	103

INDICE DELLE SIGLE

TCO: Total Cost of Ownership

EU: Unione Europea

SUV: Sport Utility Vehicle

MPV: Multi Purpose Vehicle

SCR: Selective Catalytic Reduction

EGR: Exhaust Gas Recirculation

GPL: Gas di Petrolio Liquefatto

CNG: Compressed Natural Gas

HEV: Hybrid Electric Vehicle

MHEV: Mild Hybrid Electric Vehicle

PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle

BEV: Battery Electric Vehicle

FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle

LFP: Litio Ferro Fosfato

AC: Corrente Alternata

DC: Corrente Continua

ACEA: Association des Constructeurs Européens d'Automobiles

IEC: Commissione Elettrotecnica Internazionale

ISO: Organizzazione Internazionale per la Normazione

RESS: Rechargeable Energy Storage System

PnC: Plug & Charge

RFID: Radio Frequency Identification

QR: Quick Response

CCS: Combined Charging System

CHAdMO: Charge de Move

OFV: Federazione Stradale Norvegese

NEUA: Norwegian EU Association

ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle

NTSB: National Transportation Safety Board

BTS: Bureau of Transportation Statistic

IVA: Imposta sul Valore Aggiunto

PIL: Prodotto Interno Lordo

CAPEX: Capital Expenditure

OPEX: Operational Expenditure
IPT: Imposta Provinciale di Trascrizione
PRA: Pubblico Registro Automobilistico
ACI: Automobile Club d'Italia
RCA: Responsabilità Civile Auto
SOH: State Of Health
SOC: State Of Charge
RV: Valore Residuo
WLTP: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure
EOL: End Of Life
OAT: One At a Time
PdR: Punti di Ricarica
IdR: Infrastrutture di Ricarica
MASE: Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
BAU: Business As Usual
CAGR: Compounded Average Growth Rate
PD: Policy Driven
ARERA: Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente
PNIEC: Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima
BMS: Battery Management System
V2G: Vehicle to Grid
V2H: Vehicle to Home
V2L: Vehicle to Load
ETM: Energy Transition Model
FER: Fonti Energetiche Rinnovabili
GHG: Greenhouse Gases
 CO_2 : Anidride Carbonica
 CH_4 : Metano
 CO : Monossido di Carbonio
 NO_x : Ossidi di Azoto
NMVOC: Non-Methane Volatile Organic Compounds
O&M: Operation and Maintenance
ZTL: Zona Traffico Limitato
TPL: Trasporto Pubblico Locale
CIMET: Centro Universitario Nazionale di Economia Applicata

INTRODUZIONE

I cambiamenti climatici costituiscono un problema per il mondo odierno. Il principale riferimento per contrastare questi avvenimenti in termini normativi è il Green Deal, che comprende la formulazione di leggi e l'introduzione di nuove proposte in diversi settori per trasformare l'Unione Europea e renderla più moderna ed efficiente nell'utilizzo delle risorse. Sono state formulate diverse proposte dalla Commissione Europea per ridurre le emissioni nette di gas a effetto serra del 55% entro il 2030 nei settori dell'energia e dei trasporti. Il pacchetto Fit for 55 (Figura 1) ha un ruolo centrale all'interno di questi provvedimenti perché comprende le direttive e i regolamenti di riferimento, tra cui le norme sulle emissioni di CO_2 per autovetture e furgoni.

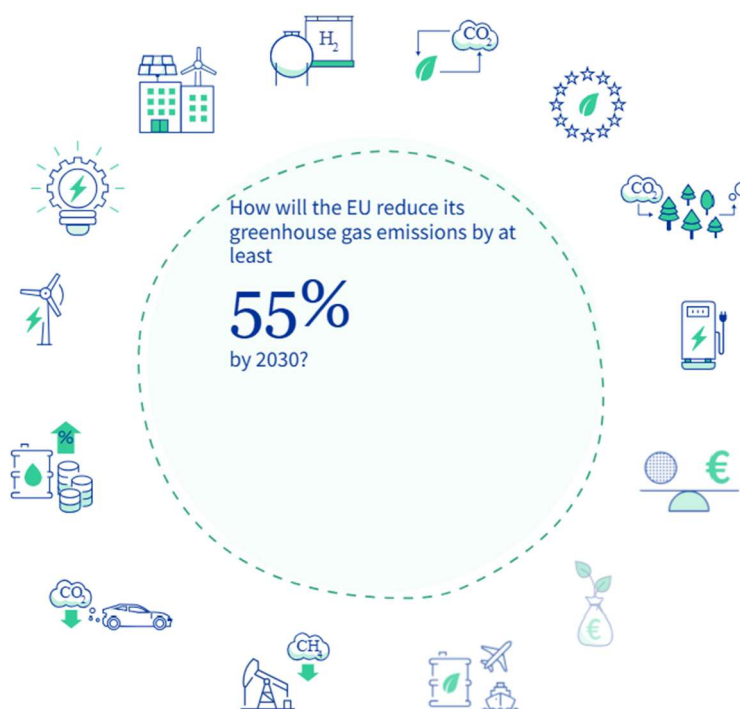


Figura 1: Rappresentazione dei settori gestiti dal pacchetto Fit for 55 [1]

L'obiettivo di questo elaborato è un'analisi di scenario comparativa per valutare l'evoluzione della mobilità del futuro in Italia, in funzione del parco veicolare. Si è analizzato lo stato dell'arte delle principali tecnologie veicolari, distinguendo le forme tradizionali di trazione, da quelle alternative. L'oggetto principale dello studio è l'auto elettrica che grazie alle tecnologie costruttive impiegate consente la riduzione della produzione locale di CO_2 . Si è tenuto conto anche degli aspetti relativi alla sicurezza e al rischio incendio, valutandone i punti di forza e si è effettuato un confronto con gli altri Paesi Europei e, in particolare, con la Norvegia per scoprire quali sono le cause del successo di questa tecnologia veicolare.

Per stabilire la convenienza di questa forma di trazione, rispetto ai veicoli tradizionali, si è calcolato il costo totale di proprietà di 16 veicoli di diverso segmento, aventi motorizzazioni e caratteristiche differenti. Il TCO consente di operare un confronto economico oggettivo e riassume in un unico parametro quella che è la spesa totale del bene in esame per tutta la vita utile. Si è tenuto conto sia dei costi fissi, che di quelli dipendenti dal chilometraggio medio annuale per un periodo di proprietà pari a sette anni. Nella formulazione dei modelli, si è tenuto conto dei vincoli reali, come la produzione di energia e la presenza di infrastrutture di ricarica sul territorio, ma anche delle normative di riferimento e dei progressi tecnologici raggiunti nell'ultimo decennio.

Sono stati formulati tre diversi scenari per stabilire la diffusione dei BEV nei prossimi cinque anni sul territorio italiano, che differiscono in particolare per le condizioni economiche, energetiche e politiche. Per lo scenario ottimistico sono state formulate possibili soluzioni e spunti per aumentare ulteriormente la convenienza economica dei veicoli elettrici a batteria e favorirne la diffusione.

Infine, sempre per lo scenario ottimistico, si è condotta un'analisi delle risorse energetiche necessarie, valutando gli effetti sulla produzione, sulle infrastrutture di ricarica e sull'integrazione del veicolo con la rete. Il tutto è stato inserito in un software di modellazione, che consente la visualizzazione immediata dei principali parametri e i cambiamenti in termini percentuali di emissioni, di costi e di impiego delle fonti energetiche rinnovabili.

CAPITOLO 1: LA MOBILITA'

La mobilità è l'insieme di sistemi, tecnologie e politiche al servizio dello spostamento delle persone e delle merci. Riguarda, quindi, sia i mezzi leggeri, come le biciclette e i monopattini, che consentono una riduzione dell'inquinamento atmosferico e possono essere impiegati sulle brevi distanze; i veicoli a due ruote, gli autoveicoli e i veicoli commerciali leggeri e pesanti che vengono impiegati nel trasporto delle merci. Si includono poi i trasporti pubblici, autobus, tram, metropolitane e treni che consentono di contrastare il problema della congestione stradale, specialmente in città. Si stanno sviluppando, negli ultimi anni, nuove forme di mobilità note come mobilità condivisa. Si tratta di servizi di car o bike sharing in cui l'obiettivo comune è la condivisione del mezzo, come l'auto o la bicicletta, per brevi spostamenti al fine di ridurre il numero di mezzi in circolazione. Grazie poi alle nuove tecnologie è possibile avere dei veicoli interconnessi senza conducente che sono in grado di spostarsi in maniera autonoma e, comunicando tra loro, possono garantire maggiore sicurezza e la riduzione dei tempi di spostamento.

1.1 La mobilità tra passato e presente

L'automobile è per definizione dal sistema di classificazione europeo 'un veicolo progettato e costruito per il trasporto dei passeggeri e avente non più di otto posti a sedere oltre al sedile del conducente, ed avente una massa non superiore a 3,5 tonnellate'.

Negli ultimi decenni, si è avuto un forte sviluppo diffuso dell'autoveicolo come sistema di mobilità principale. Tale mezzo di trasporto infatti è il simbolo di sviluppo della società occidentale e consente all'individuo di avere grandi vantaggi in termini di libertà di spostamento e di autonomia. Le automobili sono diventate la forma di mobilità preferita dalle persone a causa della loro versatilità negli spostamenti. Riescono infatti a collegare anche le aree più remote, dove i trasporti pubblici non sono presenti o non sono efficienti, garantendo l'accesso ai servizi principali come la sanità, l'istruzione o il posto di lavoro. Inoltre, sono il mezzo di trasporto preferito dagli italiani durante le vacanze perché consentono la massima libertà in termini di orario e di chilometraggio.

Basti pensare che nel 1960 [2] meno del 4% della popolazione mondiale disponeva di un'automobile. Tale valore, grazie allo sviluppo economico e al cambiamento delle esigenze della società, è salito al 9% nel 1980 e, nel 2023, ha raggiunto un valore compreso tra il 15% e il 20%; si stima il 17%, valore molto variabile a seconda della

regione mondiale analizzata. Le automobili, infatti, sono diffuse principalmente in Nord America dove sono presenti 710 autoveicoli ogni 1000 persone e in Europa dove sono presenti in media 563 autoveicoli per 1000 abitanti [3].

L'Italia si attesta al di sopra della media europea con ben 694 autoveicoli ogni 1000 abitanti (Figura 2). Questa cifra è destinata ad aumentare se continua a seguire la tendenza di crescita degli ultimi anni. Ciò rappresenta un problema per vari motivi. Primo fra questi è il numero di veicoli in circolazione che, aumentando di anno in anno, congestionano le strade causando traffico e rallentando i tempi medi di spostamento. In secondo luogo, il parco veicolare in Italia ha un'età media di 12,8 anni, con un numero elevato di veicoli che supera i 14 anni di età (Figura 3). Ciò è la causa di un valore di emissioni più elevato, che comporta inquinamento nei principali centri abitati, e rende più complicata la transizione energetica e gli obiettivi da raggiungere entro il 2030. [3]

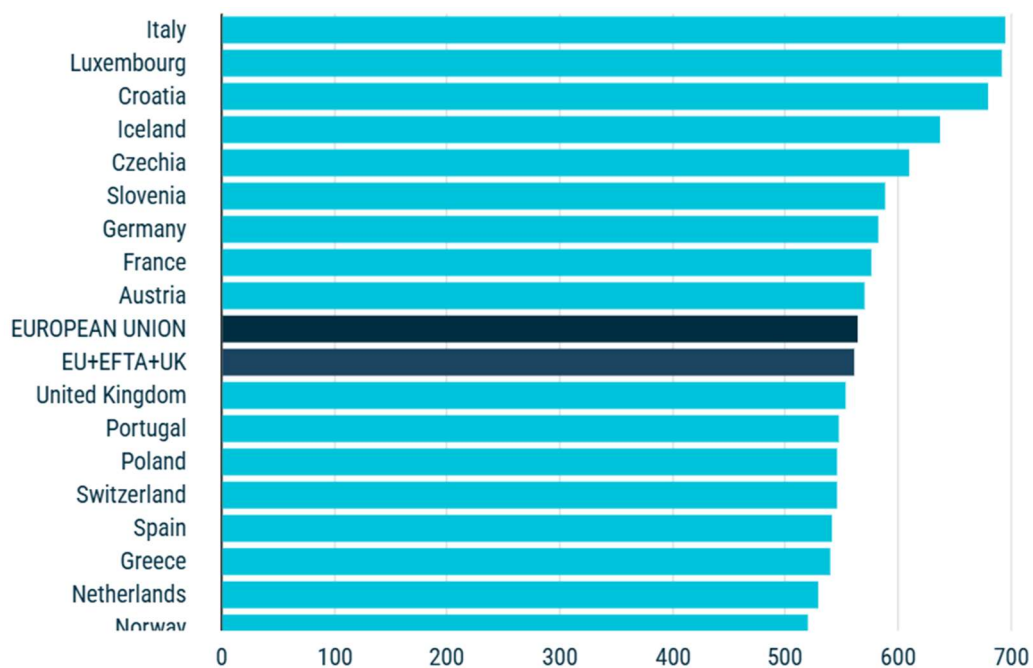


Figura 2: Rappresentazione del numero di automobili ogni 1000 abitanti [3]

In generale, nel 2023, il numero di autoveicoli su strada in EU è cresciuto in media dell'1,4% rispetto al 2022. La vita media di un'automobile in EU è di 12 anni e 6 mesi. La Grecia ha un valore superiore con una età media di 17 anni e 6 mesi, al contrario il Lussemburgo è il Paese in cui si hanno le auto più nuove con una vita media di 8 anni. Il Paese che presenta la densità di automobili più bassa è la Lettonia dove sono presenti solo 381 automobili ogni 1000 abitanti [3].

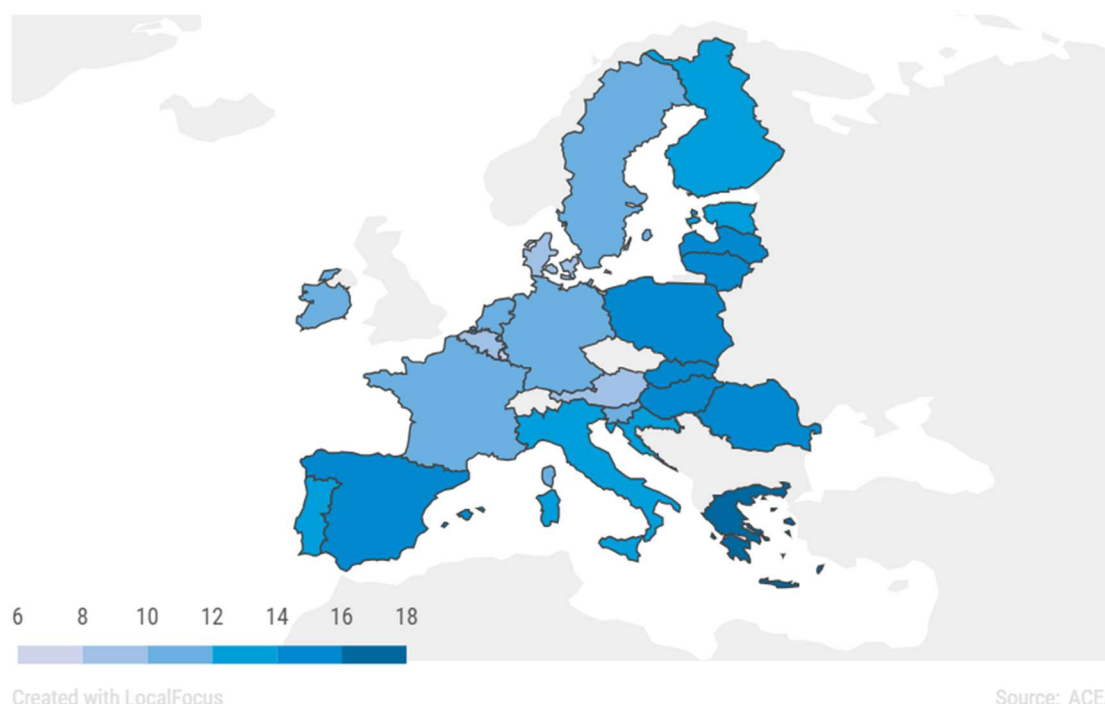


Figura 3: Rappresentazione dell'età media dei veicoli in Europa [3]

In Italia, il numero di autoveicoli in strada è aumentato dell'1,7% (Figura 4) passando da 40.213.061 unità a 40.915.229, ed è coerente con la tendenza registrata dall'EU. Si registra un aumento del 3% per i veicoli commerciali leggeri, dello 0,9% per i veicoli commerciali pesanti che superano le 3,5 tonnellate e un leggero incremento, dello 0,1%, dei bus su strada [3].

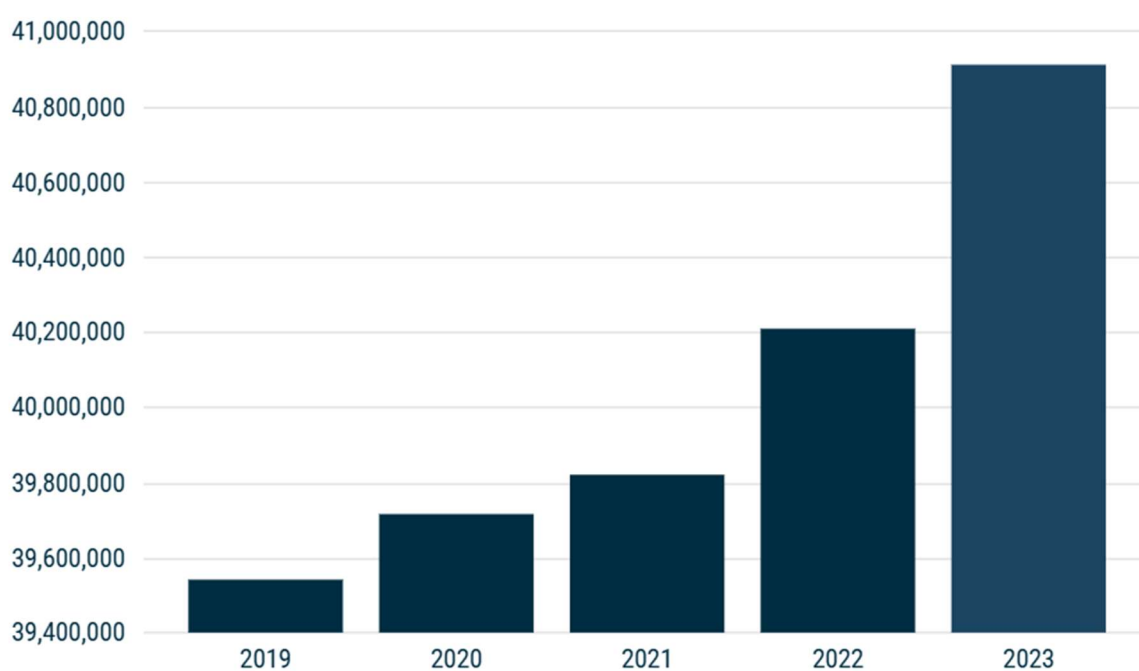


Figura 4: Istogramma rappresentante il parco veicolare in Italia [3]

Dalla Figura 5 si osserva, che il tipo di alimentazione preferito dagli italiani è la benzina con il 43,3% del totale di autoveicoli alimentato da tale carburante. Tale valore è seguito dal gasolio con il 41% ed è ben distanziato dalle altre tipologie di alimentazione. Al terzo posto, infatti, è presente il GPL con una percentuale del 7,4%, seguito dai veicoli ibridi elettrici che si attestano al 5,4%. Si osserva che il gas naturale ha avuto un decremento negli ultimi anni, raggiungendo il 2,3% nel 2023 e che le auto elettriche rappresentano lo 0,5% del totale [3].

■ Petrol
 ■ Diesel
 ■ Battery electric
 ■ Plug-in hybrid
 ■ Hybrid electric
 ■ Natural gas
 ■ LPG
 ■ Other
 ■ Unknown

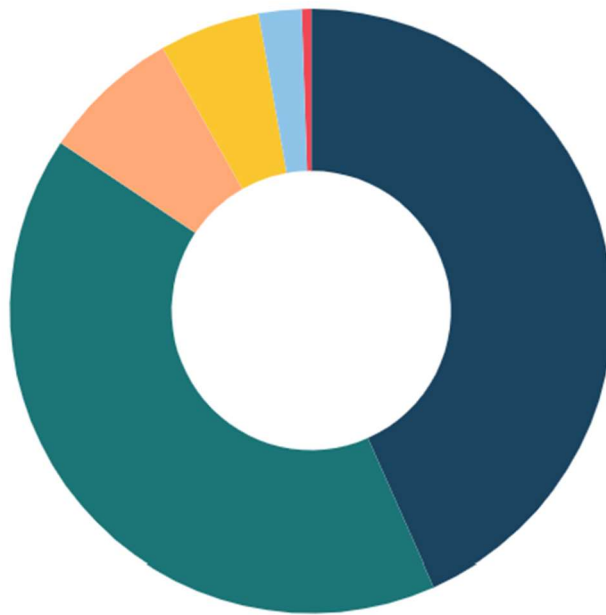


Figura 5: Diagramma a torta rappresentante le tipologie di alimentazione in Italia [3]

1.2 Classificazione per segmenti

Esistono diverse tipologie di automobili e diverse classificazioni, per dimensioni, per potenza e per prezzo. In questo elaborato si utilizzerà la classificazione per segmento, fornita dalla Commissione Europea [4], in cui si tiene conto delle dimensioni esterne dell'automobile e della tipologia di carrozzeria.

Con il termine segmento A, si intendono le auto da città di piccole dimensioni con prezzi più bassi e concepite per la mobilità in contesti urbani. Il segmento B invece è l'insieme delle utilitarie, ovvero delle automobili con lunghezza inferiore ai 4,1 metri. Rispetto alle precedenti sono più grandi e generalmente presentano un maggiore livello di comfort che le rende idonee anche per lunghi viaggi. Il segmento C è costituito da automobili di taglia media, quindi berline di dimensioni compatte a due o tre volumi idonee ad accogliere cinque passeggeri. Con il termine segmento D, invece, si fa riferimento alle berline di grandi

dimensioni, fino ai 4,9 metri di lunghezza, ideali per raggiungere grandi distanze e con elevato spazio a disposizione dei passeggeri e dei bagagli. Infine, sono presenti i segmenti E ed F in cui rientrano rispettivamente le berline premium con carrozzeria a tre volumi e le berline di lusso con una fascia di prezzo elevato, ottime finiture e motori con potenze elevate. Negli ultimi anni, il segmento J comprendente SUV e fuoristrada ha subito dei cambiamenti. Grazie all'aumento del numero di modelli di *Sport Utility Vehicle* diffusi sul mercato, infatti, nel segmento J sono rimasti i fuoristrada e i pick-up, mentre i SUV e i crossover sono diventati parte di nuovi segmenti come l'A-SUV, il B-SUV, il C-SUV e il D-SUV a seconda delle loro dimensioni.

Con la lettera M si indica un segmento che ha avuto grandi sviluppi tra gli anni '90 e i primi del 2000 ovvero quello delle MPV monovolumi, comprendente anche van e minivan, che ha registrato un forte decremento negli ultimi anni. Infine, con la lettera S si indica il segmento comprendente le auto sportive e le coupé.

Da un'analisi dei segmenti nel 2023 si registra un buon andamento delle vendite del segmento A con un aumento dell'11,1% e del segmento B con un aumento del 19,4%. Il segmento C vede un calo delle vendite che si attesta al 5,1% di quota sul totale, mentre nel segmento D crescono le berline con l'1% di quota [5].

1.3 Classificazione per tipologia di propulsione

In questa sezione si analizza lo stato dell'arte delle diverse forme di propulsione per gli autoveicoli. Grazie all'introduzione dei motori elettrici e alle nuove normative, negli ultimi anni si è evoluta molto velocemente la tecnologia presente in ciascun autoveicolo, esplorando diverse forme di trazione e migliorando quelle già presenti. Si effettua un'ulteriore distinzione tra veicoli tradizionali e veicoli alternativi.

1.3.1 Veicoli tradizionali

I veicoli tradizionali sono dotati di motore a combustione interna. Tale dispositivo ha lo scopo di convertire l'energia chimica in energia meccanica.

Il motore a benzina è la tipologia di motore più diffusa. È un motore che compie un ciclo Otto e che dispone di un dispositivo di accensione, la candela, che accende la miscela aria-carburante nella camera di combustione. Presenta un rapporto di compressione basso rispetto al motore diesel e pertanto è meno ricco di coppia ma allo stesso tempo è più graduale e meno energivoro. Ciò che rende tale tipo di propulsione molto popolare, oltre ai costi più bassi rispetto alle altre tipologie di alimentazione, è la silenziosità e la fluidità del motore. Grazie all'introduzione dei turbocompressori, ovvero di sistemi che comprimono

l'aria aumentandone la portata nel motore, e dell'iniezione diretta, che consiste nell'iniezione del carburante direttamente in camera di combustione alla pressione massima, sono migliorate l'efficienza e le prestazioni. Negli ultimi anni sono stati sottoposti a downsizing ovvero alla riduzione della cilindrata comportando una minore dispersione termica e quindi un miglioramento del rendimento. Questi motori sono poco complessi, hanno una semplice manutenzione e sono idonei all'ibridizzazione.

Il motore a gasolio è il secondo tipo di propulsione preferito dagli italiani. È molto efficiente e compie un ciclo Diesel. Si tratta di un motore ad accensione per compressione, ovvero grazie alla compressione rapida dell'aria, il gasolio iniettato si accende contemporaneamente dando luogo ad una combustione molto rapida ed efficiente. Si hanno, quindi, elevate pressioni e di conseguenza un rapporto di compressione più elevato rispetto al ciclo Otto. Il rendimento di questi motori è molto elevato e per questo motivo un motore Diesel consuma in media il 20% in meno rispetto all'equivalente motore a benzina. Esistono diverse tipologie di motore diesel, aspirati o sovralimentanti, anche se negli ultimi anni si sono sviluppati solo questi ultimi. Grazie all'introduzione dei diesel Common rail, il carburante viene immesso in camera di scoppio con tante piccole portate ad iniezioni successive. Lo svantaggio di questo motore è la produzione di particolato e di agenti inquinanti come gli ossidi di azoto che si creano a causa delle elevate temperature e pressioni in camera di combustione. È pertanto necessario adottare sistemi di trattamento dei gas di scarico che hanno lo scopo, assieme all'utilizzo combinato di catalizzatori e filtri antiparticolato, di ridurre la produzione di inquinanti. Si tratta di sistemi SCR (*Selective Catalytic Reduction*) che funzionano iniettando un'urea di tipo automobilistico in grado di convertire gli ossidi di azoto NO_x in azoto, acqua e piccole quantità di CO_2 . Ciò è possibile grazie all'impiego di un catalizzatore appositamente progettato, che agevola la reazione chimica. Sono inoltre presenti valvole EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) che hanno lo scopo di reimmettere nel cilindro una parte dei gas di scarico in modo da abbassare la temperatura di combustione e ridurre la produzione degli ossidi di azoto. Questi dispositivi generano ricircolo e devono essere molto precisi per limitare tale flusso al minimo indispensabile. La manutenzione di questi motori, per via della maggiore complessità e della componentistica, è più onerosa. Sono motori che vengono acquistati da chi compie lunghe percorrenze, e che quindi ammortizza i maggiori costi in risparmio sul carburante.

I motori a gas si sono sviluppati a partire dagli anni '90 grazie allo sviluppo delle tecnologie e ad un migliore contesto economico e politico. Sono motori che si differenziano per il tipo di gas impiegato nella combustione. Esistono infatti motori a GPL e a gas naturale. Il GPL è

composto principalmente da butano e propano ed è liquido a temperatura ambiente. È abbastanza diffuso nella rete italiana e si trova a prezzi più stabili del gas naturale. Con un motore a GPL i consumi aumentano del 30% rispetto al funzionamento a benzina a causa del minore potere calorifico sviluppato. Tuttavia, essendo molto conveniente nel prezzo al litro, si ha comunque un notevole risparmio. L'impianto è costituito da un serbatoio di forma toroidale che contiene il gas. Il GPL prima di entrare nel motore viene trasformato allo stato gassoso tramite un dispositivo che prende il nome di riduttore. All'accensione tutti i motori a GPL si avviano a benzina e solo una volta che il motore ha superato i 35° si avvia il riduttore e inizia l'alimentazione a GPL. Questi motori, rispetto a quelli a benzina da cui derivano, presentano un costo di acquisto più elevato e hanno costi di manutenzione maggiori dovuti anche al cambio obbligatorio del serbatoio dopo dieci anni dall'immatricolazione. Il vantaggio in termini ambientali è che un motore con impianto a GPL inquina il 20% in meno rispetto ad uno equivalente a benzina e non emette zolfo e piombo. Tuttavia, è un gas pericoloso perché è altamente infiammabile.

Il CNG (*Compressed Natural Gas*) invece è il gas naturale compresso a 220 bar. Noto anche con il nome metano, consente di risparmiare rispetto ad un equivalente motore a benzina, fino al 60% in termini economici. Presenta il rapporto più elevato tra energia sviluppata e quantità di anidride carbonica emessa e consente di ridurre le emissioni di particolato e NO_x . Tale alimentazione ha risentito molto della crisi energetica degli ultimi anni che ha visto l'aumento vertiginoso del prezzo di acquisto, rendendo di fatto queste auto poco convenienti e più costose nel costo di acquisto e di manutenzione rispetto ad un'auto a benzina. Pertanto, le case automobilistiche non hanno investito in ulteriori progetti e al momento sono presenti pochi veicoli nell'intera gamma di automobili con questa tipologia di alimentazione. Inoltre, questi motori sono più complessi e l'ingombro dei serbatoi riduce notevolmente lo spazio a bordo su auto di piccole dimensioni. Il metano, infatti, viene immagazzinato in bombole, ma l'autonomia di tali veicoli rimane ridotta, con valori compresi fra i 200 e i 400 km. Il CNG è meno diffuso rispetto al GPL nella rete italiana e ciò ha contribuito ad uno sviluppo solo in determinate aree fornite dai distributori. Le bombole, inoltre, devono essere collaudate ogni quattro anni, comportando ulteriori costi aggiuntivi.

1.3.2 Veicoli alternativi

I veicoli alternativi si sono sviluppati negli ultimi anni. Ne fanno parte i veicoli ibridi, quelli elettrici a batteria e i veicoli alimentati ad idrogeno.

Un motore si definisce ibrido se la propulsione avviene da due diversi sistemi accoppiati: uno alimentato da combustibile, generalmente benzina e l'altro elettrico alimentato dalla corrente stoccata all'interno delle batterie. Esistono diverse tipologie di motore ibrido: *mild hybrid*, *full hybrid* e *plug-in hybrid*.

Le auto *mild hybrid* vengono anche definite ibrido leggero (Figura 6). Sono veicoli in cui il motore elettrico presente non è in grado di alimentare l'auto. Il motore principale è un motore tradizionale a combustione a cui viene affiancato un motore elettrico di piccole dimensioni alimentato da una batteria. Questa si ricarica dall'energia generata in frenata e in decelerazione e cede poi l'energia accumulata, durante l'accelerazione garantendo supporto al motore a combustione. Le batterie possono essere a 12 volt o a 48 volt. Nel primo caso non danno vantaggi sostanziali, se non in termini fiscali, mentre nel secondo caso possono erogare fino a 20 CV. Sono motori adatti ad un utilizzo cittadino, mentre in autostrada consumano come un motore tradizionale, o anche di più per via dell'aumento di peso.

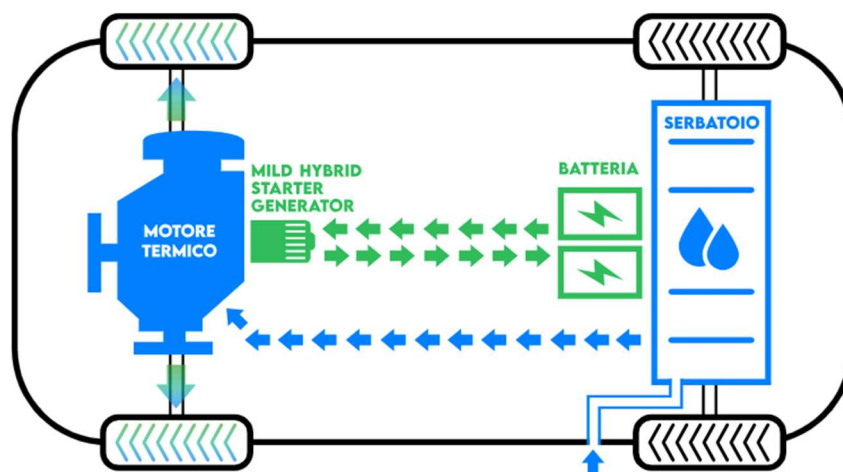


Figura 6: Schema di funzionamento di un MHEV [6]

Le auto *full hybrid* sono auto che presentano un powertrain costituito da due motori (Figura 7). La prima auto con questo motore è stata la Toyota Prius prodotta dal 1997. In questo caso è presente un motore elettrico alimentato da una batteria (più grande rispetto a quella delle ibride mild) che consente di compiere brevi percorrenze e a bassa velocità, fino a 30 km/h circa, in modalità elettrica. Questa batteria ha dimensione massima pari a 1,5 kWh e si ricarica in decelerazione e frenata. Grazie all'energia immagazzinata consente una riduzione dei consumi di carburante fino al 45% rispetto ad una tradizionale auto a benzina. Anche queste auto sono indicate per un uso prevalentemente cittadino in cui si ha la possibilità di recuperare l'energia nel traffico o in prossimità dei semafori.

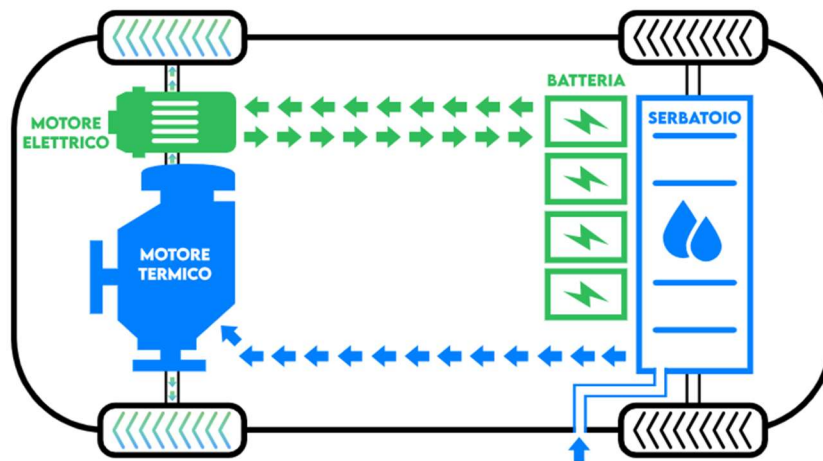


Figura 7: Schema di funzionamento di un HEV [7]

Le auto ibride plug-in rappresentano un'ulteriore evoluzione tecnologica (Figura 8). In questa configurazione è presente un motore elettrico di potenza superiore ai casi sopra indicati, che entra in uso quando si accende il veicolo, e una batteria con capacità maggiori. Tali auto permettono quindi di percorrere fino a 100 km in modalità elettrica e sono dotate di un caricatore che permette il collegamento alla rete. Consentono una notevole riduzione dei consumi e delle emissioni ma sono più pesanti e complesse rispetto alle equivalenti motorizzazioni a benzina. Sono automobili particolarmente adatte per la città o in strade extraurbane perché consentono di viaggiare in modalità full electric se la batteria è carica. Tuttavia, in autostrada con la batteria scarica si registra un aumento dei consumi dovuto al peso aggiuntivo, che può aumentare anche di 300 kg rispetto allo stesso modello dotato del solo motore a combustione. In alcuni casi, il motore elettrico viene impiegato per realizzare la trazione integrale.

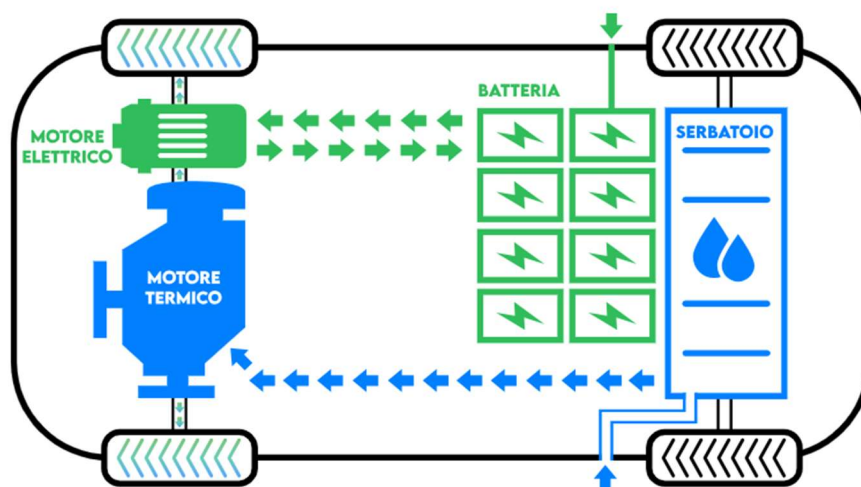


Figura 8: Schema di funzionamento di un PHEV [8]

Esiste, inoltre, una ulteriore tipologia di auto alimentata a benzina. Si tratta di un motore progettato da Nissan che commercialmente è noto con il nome di *e-power* (Figura 9). Nello specifico, la Nissan Qashqai è equipaggiata da un motore elettrico alimentato a benzina. L'auto è dotata di due motori: il motore elettrico aziona le ruote, mentre quello a benzina è un motore a compressione variabile che produce l'energia che ricarica la batteria. Pertanto, il suo funzionamento è simile a quello di un'auto elettrica, per quanto concerne le emissioni e i costi di esercizio, ma ha come punti di forza l'assenza di un cavo per ricaricare la macchina e l'assenza di soste prolungate per ricaricare l'auto alle colonnine. Inoltre, la batteria si ricarica anche grazie alla frenata rigenerativa, che permette di recuperare energia. È un motore tecnologicamente diverso dall'ibrido e in Figura 9 sono riportati gli schemi di riferimento di questa tipologia di propulsione ed è possibile osservare le principali differenze.

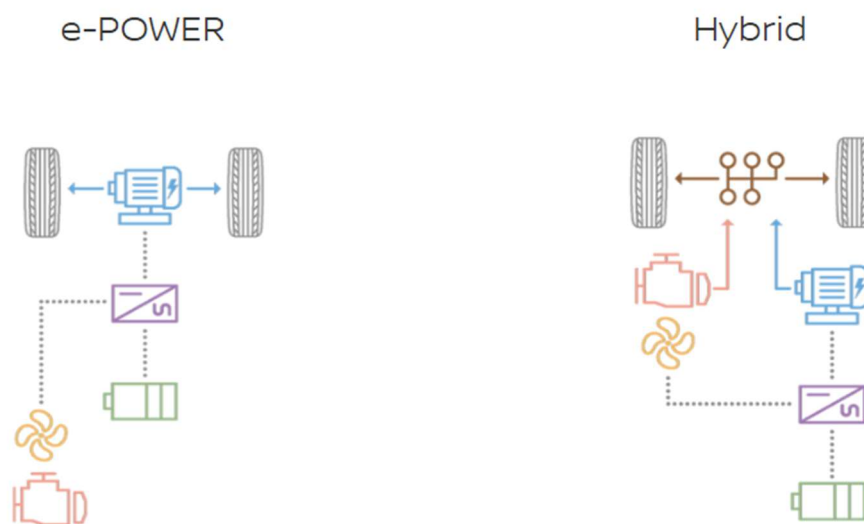


Figura 9: Confronto tra schemi di funzionamento tecnologia e-POWER vs Hybrid [9]

Le auto a idrogeno sono auto che utilizzano l'idrogeno come carburante. Presentano i vantaggi delle auto elettriche e sono dotate di un impianto a bordo che consente la conversione dell'idrogeno in elettricità. La prima auto a idrogeno ad essere commercializzata è stata la Toyota Mirai prodotta dal 2014. Si tratta di un veicolo elettrico a celle a combustibile (FCEV) a zero emissioni. L'idrogeno è contenuto in bombole ad alta pressione e viene immesso in una pila a combustibile (Figura 10). Le celle a combustibili consentono di ottenere elettricità dall'idrogeno grazie ad una reazione elettrochimica che produce anche acqua. Sono dei dispositivi che hanno elevata efficienza ma presentano anche dei limiti. Dal polo negativo arriva l'idrogeno mentre da quello positivo l'ossigeno. Grazie

alla presenza di un catalizzatore nel motore a idrogeno, gli elettroni si separano dal nucleo e viene prodotta energia elettrica. I protoni e i neutroni si spostano e si uniscono all'ossigeno producendo acqua che viene immessa nell'atmosfera sotto forma di vapore acqueo. Gli elettroni, invece, vengono immagazzinati in una batteria e vanno ad alimentare il motore elettrico. Questa reazione di ossidoriduzione è una reazione esotermica; il calore prodotto viene dissipato. In generale, la quantità di calore da dissipare su un'auto a idrogeno, così come su una auto elettrica è di quantità inferiore rispetto a quello prodotto da una equivalente dotata di motore a combustione. Infatti, il rendimento di una macchina termica è tanto maggiore, quanto meno calore si disperde nell'ambiente circostante durante il suo funzionamento.

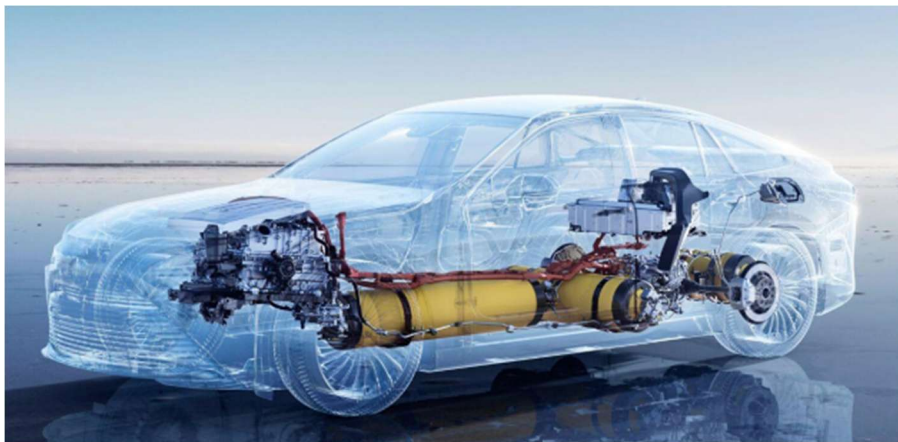


Figura 10: Rappresentazione della componentistica della Toyota Mirai [10]

L'idrogeno viene usato anche come carburante su un motore tradizionale che viene appositamente convertito. Si tratta quindi di un motore prototipato da Toyota e installato sul modello Toyota Corolla Cross. È un motore a pistoncini, con tutta la componentistica in comune con uno già esistente, ma che presenta un basso rendimento. Infatti, le reazioni di combustione dell'idrogeno avvengono ad elevate temperature, emettendo NO_x nocivi per la salute. Inoltre, in un motore di questo tipo si produce CO_2 dalla porzione incombusta degli idrocarburi contenuti nell'olio lubrificante. Queste auto sono svantaggiose a causa della maggiore complessità e dell'inquinamento, rispetto a quelle di tipo FCEV. Esistono poi i BEV, la cui trattazione è analizzata nel capitolo 2.

CAPITOLO 2: LE AUTO ELETTRICHE

In questo capitolo viene fornita una descrizione dei BEV, analizzandone aspetti costruttivi, punti di forza e aspetti negativi. Nella trattazione è stata considerata la normativa di riferimento e la sicurezza di questa tecnologia veicolare. È stato effettuato un confronto con altri Paesi Europei, in particolare, si sono analizzati i motivi del successo raggiunto da un Paese che ha fatto dell'elettrificazione del parco macchine uno dei suoi punti di forza come la Norvegia.

2.1 Caratteristiche principali

I BEV sono veicoli in cui la trazione avviene per mezzo di un motore elettrico alimentato a batteria. I motori elettrici sono motori che si sono sviluppati negli ultimi anni e sono il punto di riferimento nella transizione energetica. Sono motori molto efficienti che consentono di avere zero emissioni e sono molto silenziosi. Il motore è alimentato da un gruppo di batterie ricaricabili, di solito agli ioni di litio (Figura 11). Tali dispositivi accumulano energia chimica che viene poi rilasciata sotto forma di elettricità per alimentare il motore elettrico, che a sua volta è in grado di trasformare l'energia elettrica in energia meccanica grazie al principio dell'elettromagnetismo. Quando il campo magnetico dello statore interagisce con i magneti del rotore, crea una forza di rotazione che fa girare il motore e viene trasferita alle ruote grazie alla trasmissione. Non essendo necessaria la combustione, come nei motori tradizionali, la coppia è disponibile anche ai bassi giri e si ha una maggiore fluidità di marcia. I motori elettrici possono essere a corrente alternata o a corrente continua. I primi sono più efficienti ed è possibile controllare la velocità e la coppia regolando la frequenza e l'ampiezza dell'elettricità fornita al motore stesso. I secondi sono utilizzati invece nelle auto di piccole dimensioni e nei modelli più vecchi. In generale, le auto elettriche sono fortemente incentivate dalle politiche europee e consentono di godere di ulteriori agevolazioni indirette.



Figura 11: Struttura batteria agli ioni di litio di un'auto elettrica VW ID [11]

Le batterie sono caratterizzate dalla potenza, espressa in kWh, dalle dimensioni e dalla durata.

Un vantaggio di quelle agli ioni di litio (Figura 11) è che sono compatte ed efficienti, ad elevata densità energetica e molto versatili nell'utilizzo. Non necessitano infatti di cicli di carica e scarica completi, anche se lavorano bene solo in determinati range di temperatura. Per preservarle al meglio, si possono preriscaldare le batterie fredde e non scendere al di sotto della carica minima. Esistono poi le batterie al piombo, diffuse nei primi anni di sviluppo delle auto elettriche, che sono economiche e durature ma hanno tempi di ricarica lunghi e un elevato impatto ambientale. Infine, le batterie LFP, al litio ferro fosfato, sono un'evoluzione delle batterie agli ioni di litio e si stanno sviluppando negli ultimi anni. Usano un materiale diverso per il catodo e sono più economiche perché prive di elementi chimici preziosi. Hanno però una bassa densità energetica, ma garantiscono elevati tempi di durata. Tra i punti deboli delle auto elettriche si ha il costo di acquisto generalmente più alto e una rete di ricarica non molto sviluppata. Inoltre, può essere vincolante la capacità ridotta delle batterie, in particolare per auto di segmento A, e che la tecnologia è in forte sviluppo. Ciò rende obsolete le auto prodotte pochi anni prima con conseguente svalutazione e crollo del prezzo nel mercato dell'usato.

2.2 Infrastrutture di ricarica

Per caricare la batteria del veicolo elettrico sono necessarie le infrastrutture di ricarica. Si tratta di stazioni che svolgono una funzione analoga a quella dei distributori di carburante per i veicoli dotati di motore a combustione interna, e possono essere pubbliche o private.

I punti di ricarica ad uso domestico prendono il nome di Wallbox (Figura 12) e sono dei dispositivi che svolgono la funzione di una colonnina di ricarica, ma con dimensioni ridotte di solito installate a parete generalmente nel garage o in uno spazio di pertinenza dell'edificio a uso esclusivo. La loro funzione è quella di ricaricare la batteria del veicolo in modo idoneo e sicuro, calibrando la potenza dell'impianto elettrico domestico e quella del veicolo in carica.



Figura 12: Infrastruttura di ricarica domestica Wallbox [12]

Le colonnine di ricarica sono il mezzo attraverso il quale viene fornita energia elettrica. In Italia, sono presenti alla data del 30 settembre 2024, 60.339 punti di ricarica ad uso pubblico. Negli ultimi anni si è registrato un aumento considerevole dei punti di ricarica. Le colonnine di ricarica sono classificate in funzione della potenza erogata e della corrente. Si definiscono a ricarica lenta, quelle in corrente alternata con potenza fino a 22 kW. Sono quelle più diffuse, e assieme a quelle con potenza fino a 50 kW rappresentano la maggior parte del totale con un numero pari a 48.092. Seguono quelle in corrente continua di tipo fast con potenza compresa tra 50 kW e 149 kW con un numero pari a 8.681. Ultime per numerosità sono quelle ultra-fast con un numero pari a 3.556 [13] e con potenza superiore a 150 kW, che si differenziano per la velocità con cui riescono a raggiungere la ricarica completa del veicolo. Infatti, tali infrastrutture, permettono di raggiungere l'80% di ricarica in tempi inferiori ai 40 minuti, al contrario delle 7/12 ore previste per quelle di tipo lento. Di solito vengono impiegati in stazioni di servizio o in zone ad alta affluenza, dove i tempi di ricarica devono

necessariamente essere ridotti. I *fast charge* utilizzano corrente continua e sono dotati dei propri cavi per la ricarica, al contrario delle colonnine normali che sono a corrente alternata e vengono installate in luoghi in cui il veicolo rimane parcheggiato per periodi più lunghi. Per tale motivo sono diffuse principalmente nei centri abitati e nei pressi di luoghi di aggregazione.

Globalmente, l'Italia si colloca in Terza posizione in Europa con 19 punti di ricarica ad uso pubblico ogni 100 BEV circolanti, dopo Olanda e Belgio e in Quarta posizione per quanto riguarda la numerosità delle colonnine in funzione della lunghezza della rete stradale con un punto di ricarica ogni 4,6 Km. Sono presenti però delle disparità all'interno della Nazione (Figura 13). Infatti, la maggior parte delle infrastrutture si colloca al Nord, con la Lombardia che da sola conta 11.687 punti di ricarica, seguita dal Piemonte con 6.035. Al centro è presente il 19% del totale con il Lazio che conta 11.687 punti di ricarica e infine il Sud con il 23% dei punti di ricarica totali [13].

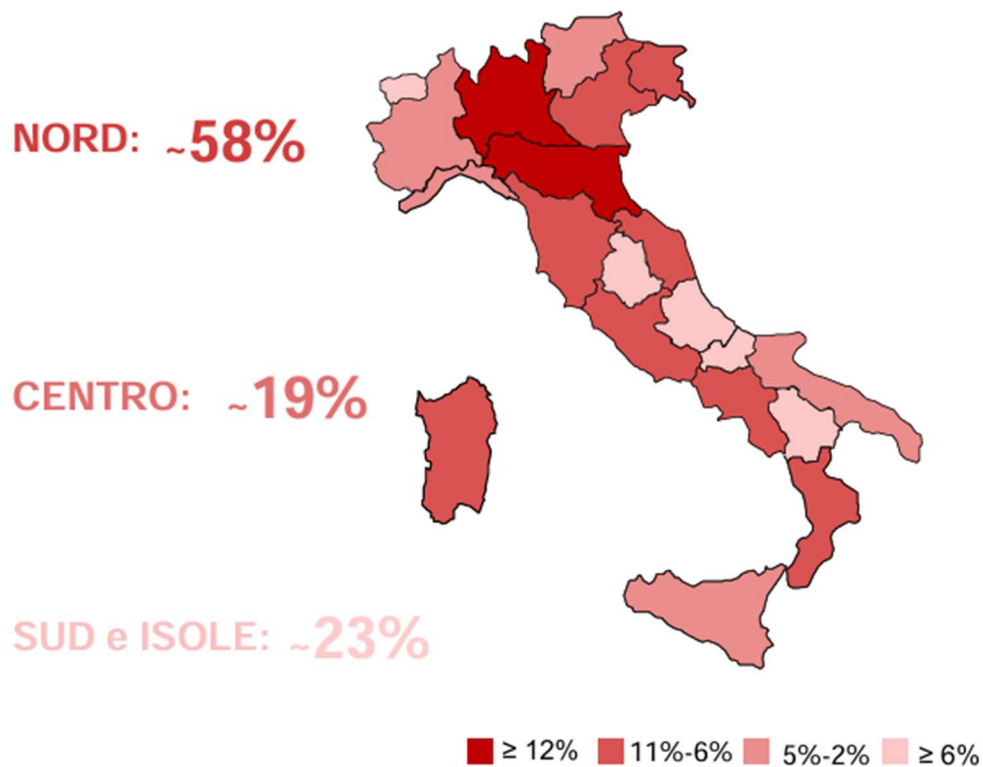


Figura 13: Distribuzione delle IdR sul territorio nazionale [14]

2.3 Normative di riferimento

La diffusione dei veicoli elettrici nel mondo e i progressi nelle tecnologie delle batterie hanno portato allo sviluppo di nuovi standard per garantire la sicurezza dei veicoli elettrici. La definizione di uno standard e di certificazioni globali è fondamentale per uniformare i

processi di test e per stabilire dei parametri di riferimento attraverso certificazione. In un BEV bisogna garantire il corretto funzionamento non solo delle batterie, ma anche delle infrastrutture di ricarica, dei connettori a spina, degli interruttori e dei cavi. Inoltre, bisogna effettuare prima dei test che stabiliscano il corretto funzionamento delle batterie al fine di evitare incidenti che vedano coinvolti gli occupanti del veicolo e l'ambiente circostante. Diversi standard sono stati pubblicati dall'IEC, la Commissione Elettrotecnica Internazionale, e dall'ISO, l'Organizzazione Internazionale per la Normazione. Lo sviluppo delle linee guida contribuisce all'innovazione e definisce uno standard che uniforma le diverse aree di produzione dei veicoli elettrici quali l'Europa, la Cina, il Giappone e il Nord America. Sono presenti quattro aree tematiche diverse [15], rappresentate in Figura 14:

- *Safety and Security*: definisce gli standard di sicurezza e protezione;
- *Charging Topology*: specifica la topologia di ricarica;
- *Communication*: definisce le comunicazioni relative alla ricarica dei veicoli elettrici;
- *Connector*: definisce lo standard per i connettori di ricarica.



Figura 14: Rappresentazione delle normative di riferimento nei diversi ambiti [15]

La prima area riguarda i test di sicurezza ed è definita dalla normativa ISO 6469 [16]. Tale normativa è divisa in tre parti; nella prima '*On-board rechargeable energy storage system* (RESS)' sono definiti i requisiti delle batterie come la misurazione della resistenza di isolamento della batteria ma anche l'emissione di gas pericolosi, il rischio di incendio ed esplosione, la generazione di calore o di sovra-corrente. È effettuata anche la realizzazione di un crash test che valuta la protezione degli occupanti e contro i corto circuiti. La seconda parte '*Vehicle operational safety means and protection against failures*' definisce i requisiti relativi alla protezione contro i guasti associati dovuti alla propulsione elettrica. Specifica

quindi la sicurezza funzionale. La terza parte definisce la protezione delle persone dai rischi elettrici.

Esistono poi ulteriori standard relativi a sicurezza e protezione elencati in seguito.

- ISO/IEC 27000
- IEC 60364-7-722
- SAE J1766
- ISO 17409
- ISEC 61140
- IEC 62040
- IEC 60529

La seconda area tematica è definita dallo standard IEC 61851 che descrive 4 diversi modi ricarica [17].

- Modo 1 (Figura 15): è il collegamento del veicolo elettrico alle normali prese di corrente di tipo Schuko 230V. Il veicolo viene caricato come un normale dispositivo e collegato alla rete domestica senza l'installazione di una stazione di ricarica domestica, purché sia presente un interruttore differenziale da 30 mA di tipo A. La corrente è alternata e fino a 16 A;
- Modo 2 (Figura 16): prevede una stazione di ricarica in corrente alternata con potenza massima fino a 22 kW che controlla il processo di ricarica e svolge anche una funzione di protezione;
- Modo 3 (Figura 17): in questo caso il collegamento tra il veicolo e la rete avviene per mezzo di stazioni di ricarica fissa in corrente alternata, come Wall box o colonnine pubbliche che svolgono funzione di controllo e di protezione. Possono avere una potenza massima di 22 kW e la ricarica avviene in corrente alternata, tramite il cavo a bordo del veicolo.
- Modo 4 (Figura 18): è presente una stazione di ricarica in corrente continua dotata di caricabatteria che svolge funzione di controllo e protezione ma anche di regolazione della corrente. Si tratta dei *fast charge* che hanno una potenza massima di 350 kW, e quindi superiore ai 22 kW del modo 3.

MODO 1

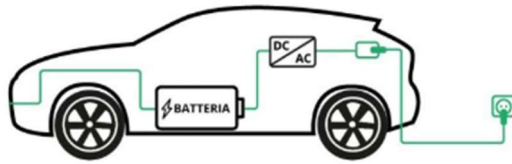


Figura 15: Rappresentazione schema di ricarica Modo 1 [18]

MODO 2

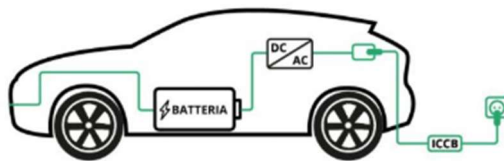


Figura 16: Rappresentazione schema di ricarica Modo 2 [18]

MODO 3

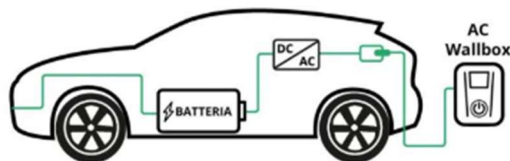


Figura 17: Rappresentazione schema di ricarica Modo 3 [18]

MODO 4

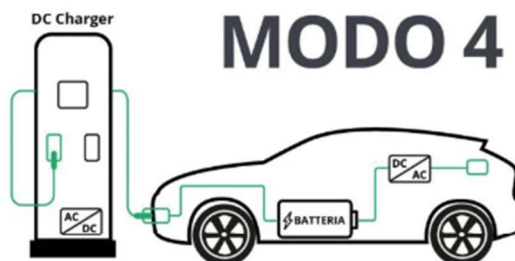


Figura 18: Rappresentazione schema di ricarica Modo 4 [18]

La comunicazione viene definita dallo standard internazionale ISO 15118 [19] che sancisce la comunicazione bidirezionale tra il veicolo elettrico e la stazione di ricarica. È la norma che definisce l'interfaccia di comunicazione V2G e V2H, ma anche il metodo PnC (*Plug & Charge*) attraverso uno standard comunicativo unificato. Il PnC consente un rapido scambio di informazioni tra il veicolo e la stazione di ricarica, che identifica il veicolo, il proprietario

e il metodo di pagamento grazie ad un certificato digitale e permette un processo di carica end-to-end senza utilizzare schede con chip RFID, app o codici QR.

La quarta area tematica riguarda i connettori di ricarica. Esistono diverse tipologie di connettore che variano a seconda del produttore (Figura 19). In Europa e in Nord America viene supportato il sistema di ricarica combinato CCS (*Combined Charging System*). Nella prima si adotta per la ricarica in AC un connettore di tipo 2, mentre per quella in DC il CCS2. Nella seconda, invece si adotta per la corrente alternata un connettore di tipo 1, mentre in DC il CCS1. In Giappone è diffuso il sistema CHAdeMO (*Charge de Move*) per la ricarica in DC, mentre quello di tipo 1 per la ricarica in AC. In Cina si usa lo standard GB/T [15].

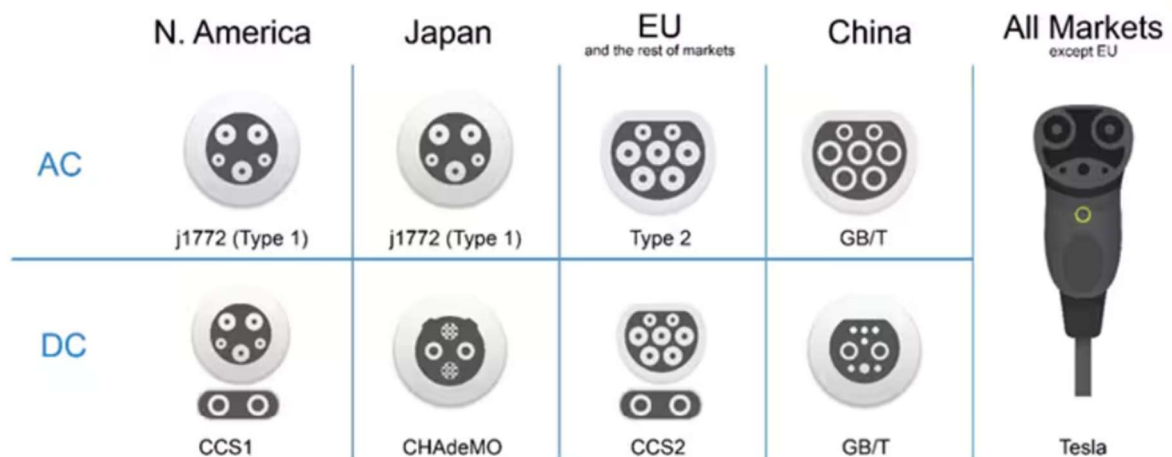


Figura 19: Rappresentazione dei Connettori di ricarica nelle diverse aree geografiche [15]

2.4 Rischio incendio

Uno degli aspetti che è interessante approfondire è il rischio di incendio per i veicoli elettrici. Il rischio incendio di un veicolo si misura in funzione della probabilità che avvenga e delle conseguenze dovute all'energia rilasciata dalle fiamme che possono propagarsi ad altri veicoli e all'ambiente circostante. In generale, la probabilità che l'incendio si propaghi in caso di incidente, nei veicoli BEV, è inferiore rispetto agli ICEV poiché non si ha diffusione del carburante e il *jet-fire* interessa la zona inferiore del veicolo [20].

Per i veicoli elettrici il rischio incendio è relativo alle batterie. Queste componenti sono costituite da elementi chimici reattivi come gli ioni di Litio e sono prodotte e certificate secondo normativa.

Le cause di incendio per un BEV sono:

- Sovraccarico;
- Cortocircuito;

- Penetrazione di oggetti;
- Difetti di produzione.

I danneggiamenti sopracitati possono dare luogo a delle reazioni di *thermal runaway*, ovvero delle reazioni in cui si ha riscaldamento incontrollato che può causare incendio ed esplosioni. Va specificato che le batterie sono dotate di dispositivi di protezione attivi e passivi. Il guscio protettivo svolge una funzione di protezione dagli urti, mentre altri dispositivi permettono di limitare l'aumento della temperatura disabilitando le celle coinvolte nel malfunzionamento o isolando l'intera batteria. Inoltre, prima di essere immesse in commercio, vengono effettuate sulle batterie delle prove di stress termico e meccanico e viene realizzato il test *end of line*.

Al contrario che per le auto endotermiche, per i veicoli elettrici non sono stati trovati sufficienti dati riguardanti il panorama italiano. Pertanto, si sono presi come riferimento dei dati a livello globale. Dall'osservazione dei dati raccolti dal *National Transportation Safety Board* (NTSB), e dal *Bureau of Transportation Statistic* (BTS) si osserva che le auto elettriche sono quelle più sicure con un numero di incendi pari a 52, su 215.636 casi analizzati [21].

Dalla Tabella 1 e dalla Figura 20 si evince che il rischio incendio per le ibride è molto più elevato che per i BEV e questo è imputabile alla compresenza del motore endotermico e della batteria ad alta tensione, ma anche alla maggiore complessità che vede l'integrazione del sistema elettrico ed ibrido.

Tabella 1: Dati relativi al Rischio incendio [21]

Motorizzazione	Incendi ogni 100000 auto	% su 100000 auto vendute	Numero incendi analizzati	% sul totale incendi
BEV	25	0,03%	52	0,02%
HEV	3.474	3,47%	16.051	7,44%
ICE	1.530	1,53%	199.533	92,54%
TOTALE	5.029	100%	215.636	100%

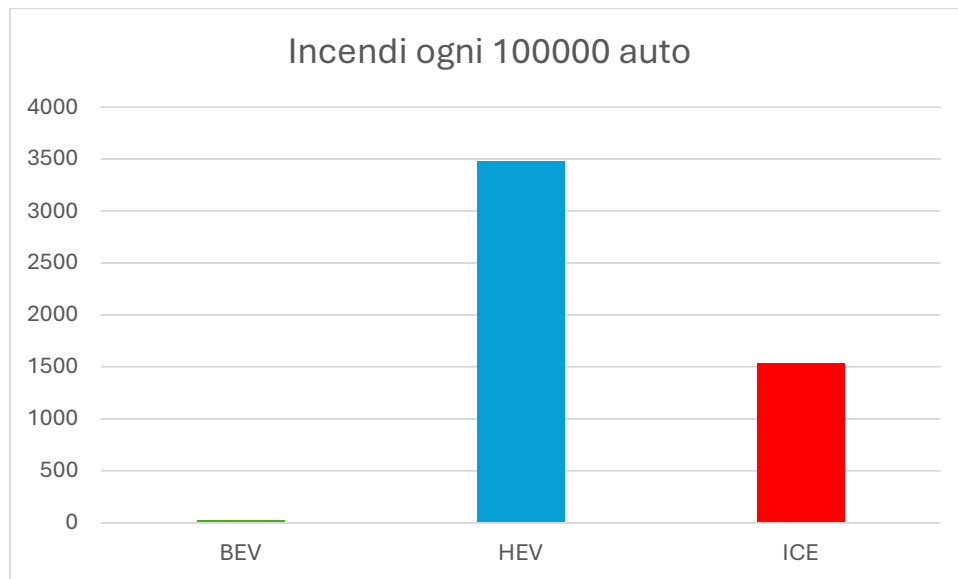


Figura 20: Istogramma rappresentante il numero di incendi ogni 100.000 auto per tipologia di trazione [21]

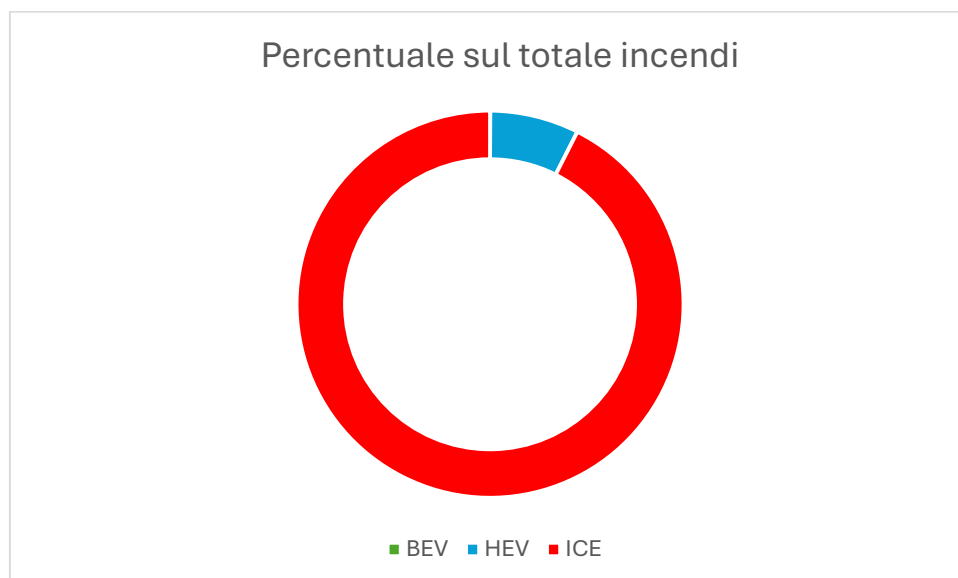


Figura 21: Grafico a torta rappresentante la percentuale di incendi per tipologia di trazione sul totale [21]

Sebbene le auto elettriche abbiano una probabilità di incendio più bassa (Figura 21), in termini di conseguenze possono essere anche peggiori di quelle endotermiche. Questo perché l'incendio dell'auto endotermica è più semplice da spegnere, con degli estintori ad anidride carbonica, mentre per le auto a batterie, l'incendio si può fermare solo raffreddando la batteria e impiegando notevoli quantità di acqua. Quindi gli incendi delle auto endotermiche sono di durata e intensità inferiore, mentre per i BEV la batteria può bruciare per ore prima di spegnersi e il personale dei vigili del fuoco deve essere preparato e addestrato adeguatamente. In alcuni casi le batterie possono riaccendersi, se il calore generato è abbastanza grande e arrivare all'esplosione.

2.5 Confronto con Paesi Europei

Per comprendere al meglio la diffusione dei veicoli elettrici in Italia, rispetto agli altri Paesi Europei sono stati analizzati due report. In queste pubblicazioni sono contenuti dei dati con lo scopo di evidenziare le principali differenze in termini di nuove immatricolazioni e di percentuale di auto elettriche a batteria sul totale del parco veicolare.

I dati riguardanti le nuove immatricolazioni in Europa sono stati presi dalla pubblicazione dell'ACEA, datata 22 ottobre 2024 [22]. In essa sono contenuti gli andamenti del mercato dei BEV per i Paesi dell'UE, confrontando la tendenza registrata nel 2024 con quello dei due anni precedenti (Figura 22). Tali indicazioni sono aggiornate alla data di settembre 2024; pertanto, il periodo di riferimento è di 12 mesi a partire dal mese di ottobre.

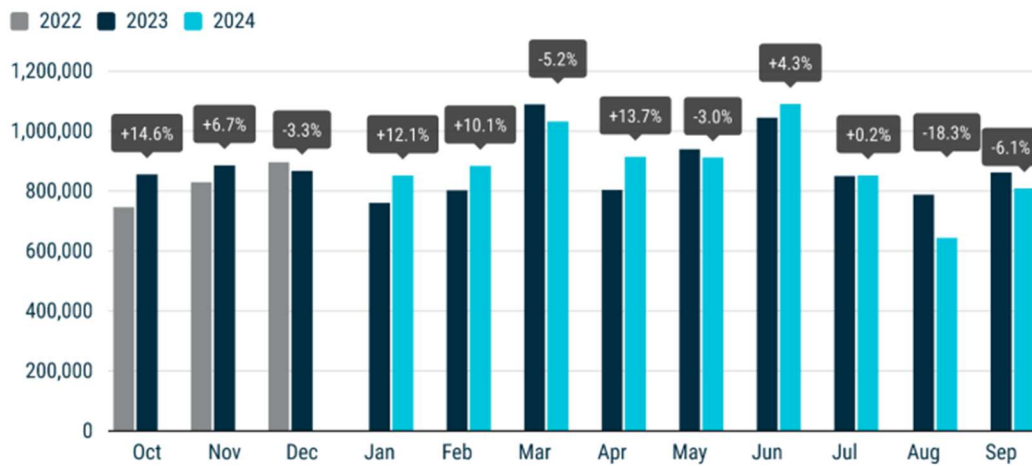


Figura 22: Grafico a barre rappresentante il confronto delle immatricolazioni percentuali BEV [22]

Per alcuni Paesi si è deciso di riportati i dati in termini di nuove immatricolazioni. In Tabella 2 sono riassunti tali dati e si è evidenziata la differenza in termini percentuali di immatricolazioni registrate a parità di periodo di riferimento per ciascun Paese.

Tabella 2: Nuove immatricolazioni BEV nei Paesi Europei

NUOVE IMMATRICOLAZIONI			
	<i>Gen./Set. 2024</i>	<i>Gen./Set. 2023</i>	<i>Variazione %</i>
AUSTRIA	32.632	34.894	-6,50%
GERMANIA	276.390	387.289	-28,60%
FRANCIA	216.841	204.626	+6%
ITALIA	48.217	45.761	+5,40%
LUSSEMBURGO	9.681	8.123	+19,20%
GRECIA	5.602	4.943	+13,30%
SPAGNA	37.994	34.607	+9,80%
PORTOGALLO	29.068	25.655	+13,30%
PAESI BASSI	90.451	84.959	+6,50%
DANIMARCA	60.842	40.797	+49,10%
POLONIA	12.497	12.158	+2,80%
UNGHERIA	6.530	4.197	+55,60%

Si osserva che in termini assoluti, l'Italia ha immatricolato meno veicoli elettrici rispetto alla Francia, alla Germania, ma anche rispetto alla Danimarca e ai Paesi Bassi. In tali Stati i volumi di vendita sono elevati. Ciò è imputabile, oltre che ad una maggiore ricchezza generale, anche ad incentivi economici maggiori all'acquisto. Inoltre, in tali Paesi, l'infrastruttura di ricarica è maggiormente sviluppata andando a coprire la rete autostradale e le aree urbane in maniera capillare (Figura 23). Ultima ma non per importanza, la mentalità e l'attenzione all'ambiente, che nei Paesi del Nord Europa è mediamente più alta che in Italia. Le persone sono disposte ad acquistare un BEV poiché sono consapevoli di ridurre l'impatto ambientale a favore di una mobilità più sostenibile che viene incentivata grazie all'accesso a ZTL, ad una riduzione dei costi dei parcheggi e all'introduzione di nuove tasse per i veicoli maggiormente inquinanti. Si tratta di tasse che vengono applicate in alcune città e che limitano l'accesso alle zone più trafficate per evitare problemi relativi alla congestione stradale e allo smog.

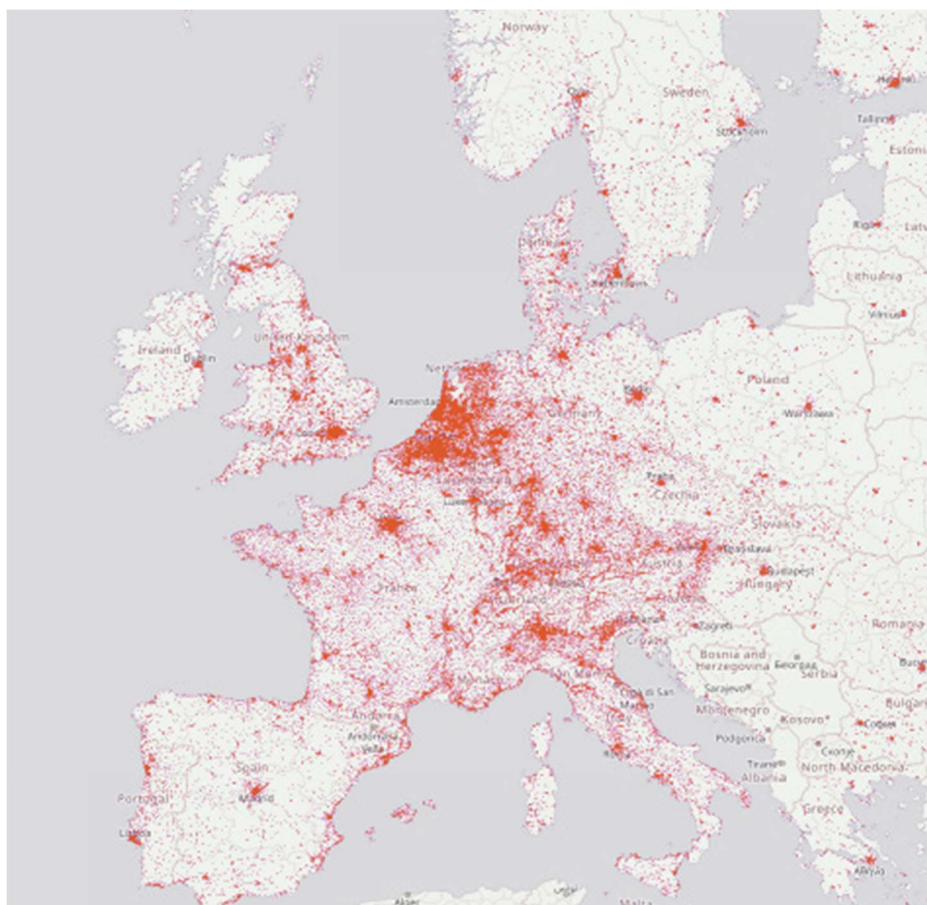


Figura 23: Distribuzione delle infrastrutture di ricarica sul territorio europeo [23]

Nonostante in Italia il valore delle nuove immatricolazioni sia ancora basso, si è registrato un aumento percentuale in termini di vendite pari al 5,4%. Questo valore è positivo, ma inferiore rispetto a quello registrato nella maggior parte dei Paesi, fatta eccezione per la Polonia, che registra comunque una tendenza positiva e pari al 2,8%. Austria e Germania invece vedono un crollo delle vendite di BEV rispettivamente di 6,5 punti percentuali e di 28,6 punti percentuali. Questo è un segnale positivo che indica un punto di inizio per il cambiamento della mentalità italiana.

Analizzando la pubblicazione [3] dell'ACEA pubblicata nel mese di gennaio 2025, si contestualizza al meglio la composizione del parco veicolare di ciascun Paese. Tale report, nella versione più aggiornata, fa riferimento all'anno 2023. Pertanto, i valori sono diversi da quelli considerati in precedenza. In Tabella 3 è indicata la percentuale di veicoli elettrici a batteria sul totale delle autovetture registrate nell'anno 2023.

Tabella 3: Percentuale di BEV sul totale del parco auto circolante [3]

	% BEV
AUSTRIA	3%
GERMANIA	2,90%
FRANCIA	2,20%
ITALIA	0,50%
LUSSEMBURGO	4,90%
GRECIA	0,20%
SPAGNA	0,60%
PORTOGALLO	1,80%
PAESI BASSI	4,90%
DANIMARCA	7,10%
POLONIA	0,30%
UNGHERIA	1%

Si osserva che l'Italia con lo 0,5% di BEV, si attesta sul fondo della classifica. Tra i Paesi più virtuosi rientrano la Danimarca e i Paesi Bassi, seguiti dal Lussemburgo. Francia e Germania presentano una composizione simile del parco veicolare in termini di veicoli elettrici. Anche la Spagna e l'Ungheria hanno dei valori migliori di quelli registrati in Italia, con valori superiori allo 0,5%. Gli unici Paesi tra quelli presenti in tabella, con una percentuale inferiore di veicoli elettrici a batteria sul totale sono la Grecia e la Polonia con rispettivamente lo 0,2% e lo 0,3% di BEV. Ciò è la conseguenza di un'infrastruttura di ricarica poco sviluppata, in particolare nelle aree extra urbane e di un reddito medio generalmente più basso, se confrontato con gli altri Paesi. Se a tali condizioni si aggiunge un'incentivazione meno forte da parte dei governi, come risultato si ha un parco circolante più vecchio e di conseguenza più inquinante.

2.6 Il caso norvegese

La Norvegia è pioniera, tra i Paesi Europei, nella transizione energetica. In particolare, in questo paragrafo, si analizza la penetrazione delle auto elettriche a batteria nel mercato, analizzandone le cause principali, le politiche a sostegno della transizione e i vantaggi in termini economici.

In Norvegia nel 2024 sono stati venduti 128.691 veicoli. L'89% di questo valore, 114.400, sono auto elettriche (Figura 24) [24]. Questo valore è in crescita rispetto all'anno precedente dell'1,4%. In seconda posizione si attestano le vendite di auto ibride a benzina con un valore pari al 5,3% del totale, seguite da *plug-in hybrid* con il 2,7%, il diesel con il 2,3% e infine la benzina con lo 0,7%.

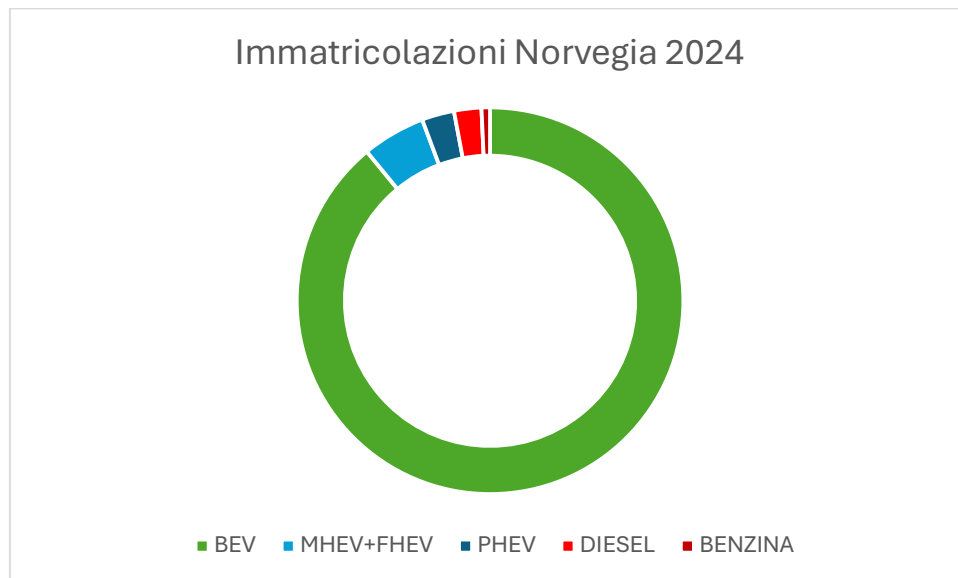


Figura 24: Grafico a torta rappresentante le Immatricolazioni in Norvegia nel 2024 [24]

Grazie a questi numeri, nel mese di settembre 2024, infatti si è registrato un risultato sorprendente, come riportato nel grafico in Figura 25. Il numero di veicoli elettrici in circolazione ha superato il numero di veicoli a benzina, con un valore di 754.603, contro i 753.905 a benzina. Uno dei prossimi obiettivi, ha dichiarato il segretario generale dell'Associazione norvegese dei veicoli elettrici è quello di superare anche il valore delle auto Diesel che rappresenta ancora il 35% del totale. Ciò sarà possibile grazie all'aumento delle tasse sui veicoli a combustione.

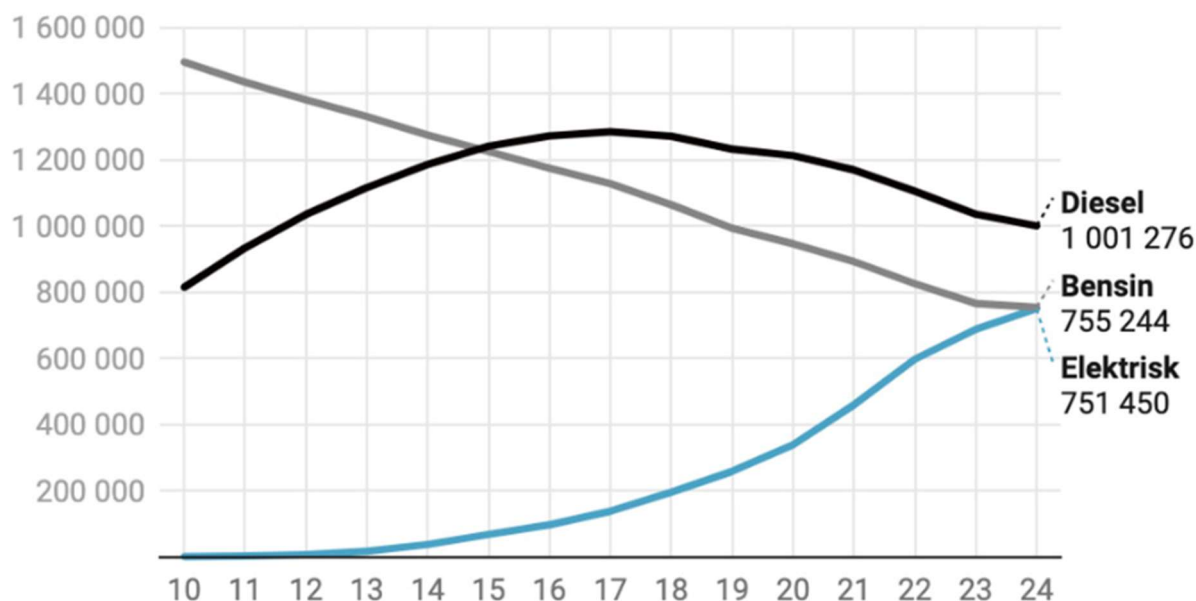


Figura 25: Diagramma raffigurante lo sviluppo del parco auto norvegese nel periodo 2010-2024 [25]

I risultati raggiunti sono il frutto di un'azione sinergica che vede coinvolta in primo luogo la politica, ma anche l'economia e gli aspetti sociali per la sostenibilità. Le prime sperimentazioni sono incominciate negli anni '90 quando il governo ha deciso di incentivare i veicoli a zero emissioni eliminandone le tasse di registrazione. Successivamente, negli anni 2000, sono stati introdotti degli incentivi con il fine di ridurre la differenza di costo tra un BEV e il corrispondente ICEV. Al giorno d'oggi i benefici sono molteplici e vengono elencati di seguito:

- esenzione da IVA: chi acquista un veicolo a zero emissioni ha diritto all'esenzione dell'IVA che in Norvegia vale il 25%;
- esenzione dalle tasse di immatricolazione;
- assenza di dazi sui BEV: il governo ha deciso di eliminare i dazi di importazione per i veicoli elettrici e di imporli sui veicoli tradizionali;
- esenzione dalla tassa di circolazione;
- parcheggio gratuito: chi acquista un veicolo elettrico può beneficiare del parcheggio gratuito in molte aree del Paese;
- riduzione dei costi di trasporto: si ha una riduzione del 50% dei costi stradali dovuti al pedaggio autostradale, e fino al 50% di sconti per il trasporto sui traghetti.

I benefici sono quindi sia diretti, all'acquisto del veicolo, che indiretti. Un ulteriore aspetto positivo, per i possessori di BEV è la possibilità di circolare su corsie preferenziali, per esempio quelle dedicate agli autobus, se si trasporta un passeggero. In Norvegia, inoltre, si

ha un costo dell'energia più basso dovuto alla produzione da fonte energetica idroelettrica. Ciò permette di avere in media un costo ridotto dell'energia compreso tra 0,07 €/kWh e 0,10 €/kWh. Costi più bassi si registrano nella parte nord della Norvegia, mentre al sud si hanno degli aumenti consistenti. Quanto detto finora, si traduce in una notevole riduzione dei costi da sostenere durante il periodo di possesso del bene, e di conseguenza del costo totale di proprietà di un veicolo elettrico, rendendolo più conveniente rispetto al corrispondente ICEV.

Occorre precisare che, è stato possibile finanziare tutte le agevolazioni grazie ai proventi dell'industria dei combustibili fossili. Si stima un valore di oltre 1.700 miliardi di dollari che ha consentito alla Norvegia di offrire incentivi di valore superiore rispetto agli altri Paesi.

Tuttavia, il meccanismo basato sulla sola incentivazione non è sufficiente a giustificare un elevato sviluppo dei BEV. È necessario avere una adeguata infrastruttura di ricarica che consente agli utenti di ricaricare il proprio veicolo. Con un numero di abitanti pari a 5,5 milioni e una densità di popolazione di 16 abitanti per chilometro quadrato, è più semplice per gli abitanti della Norvegia accedere alla ricarica domestica, soprattutto se il confronto avviene con l'Italia. La maggior parte delle abitazioni norvegesi è dotata di garage, e quindi, di un'infrastruttura di ricarica privata che consente agli automobilisti di caricare principalmente il proprio veicolo a casa, rendendo disponibili le stazioni di ricarica a chi non ne ha la possibilità e ai turisti. La rete di ricarica pubblica è fitta e costituita da circa 13.000 posti di ricarica, di cui 2.000 nella città di Oslo a libero accesso; per usufruire del servizio non sono necessarie applicazioni, tessere o abbonamenti perché si ha la possibilità di pagare con carta di credito, al contrario di quanto accade in Italia.

Ultimo ma non per importanza è l'aspetto culturale ed economico. La Norvegia presenta un valore di PIL pro-capite elevato ed è ben disposta e aperta alla transizione energetica e ai BEV, al contrario dell'Italia in cui si ha ancora scetticismo nei confronti di questa tecnologia. Tale indicatore economico rappresenta il benessere economico di una popolazione ed è un valore di riferimento della ricchezza media. Con un valore pari a 87.961,78 \$ per l'anno 2023, corrispondenti a 85.148,06 €, gli abitanti della Norvegia hanno un potere di acquisto più elevato e maggiore benessere, soprattutto se confrontato con il valore di riferimento per l'Italia, 38.373,17 \$, corrispondenti a 37.145,69 €. L'auto più venduta in Norvegia, infatti, è la Tesla Model Y (Figura 26), che da sola costituisce all'incirca il 13% delle vendite dell'intero mercato con 16.858 unità vendute nel 2024 [26]. Tale auto ha un prezzo di acquisto pari a 36.141 € [27]. In Italia l'auto più venduta nel 2024, è stata la Fiat Panda che

con 97.614 auto vendute rappresenta all'incirca il 6,2% del totale e presenta un prezzo di partenza pari a 15.900 € [28].



Figura 26: Auto più venduta in Norvegia - Tesla Model Y [29]

CAPITOLO 3: METODOLOGIE

In questo capitolo si vuole costruire un modello per confrontare dal punto di vista economico le diverse forme di trazione nelle automobili, attraverso il calcolo del TCO. Il TCO (*Total Cost of Ownership*) è uno strumento che viene impiegato per valutare il costo totale di proprietà di un bene considerato. Nel caso specifico, si è formulato un modello per il calcolo del TCO per degli autoveicoli al fine di operare un confronto tra le tipologie tradizionali e quelle più recenti nel settore automobilistico. Grazie a questa analisi è possibile comprendere quale tipologia di trazione risulta essere la più conveniente, poiché i molteplici parametri e fattori di cui bisogna tener conto vengono riassunti in un unico risultato finale. Si tiene conto, nel calcolo di tale valore, non solo del prezzo di acquisto del veicolo ma anche dei costi operativi e di mantenimento.

3.1 Analisi della letteratura

In letteratura sono presenti diversi studi che hanno affrontato il calcolo del TCO per diverse tipologie di veicolo. Al fine di ottenere una formulazione che fosse valida e tenesse conto di vari parametri e delle condizioni al contorno, si sono analizzate le diverse pubblicazioni evidenziandone i punti di forza e le differenze, per giungere poi alla formulazione generale del modello.

La prima distinzione che occorre fare tra le diverse pubblicazioni è la zona geografica di riferimento. Sono molti gli studi condotti sul territorio europeo. In Italia, invece, il numero di pubblicazioni che fanno riferimento al calcolo del TCO per gli autoveicoli è ridotto (Tabella 4). In particolare, ne sono stati analizzati tre, condotti negli ultimi anni. Il più recente risale al 2019 [30] ed è un'analisi del costo totale di proprietà delle auto elettriche che valuta l'impatto della distanza annua percorsa, della ricarica domestica e della guida urbana. Il secondo studio preso in considerazione risale al 2017 [31], ed è un modello probabilistico del costo totale di proprietà per valutare le prospettive della diffusione delle auto elettriche in Italia. Infine, il terzo articolo esamina la situazione italiana e il periodo di riferimento è il 2013 [32].

Tabella 4: Panoramica dei contributi sul territorio italiano

CONTRIB.	AUTORE	ANNO DI PUBBL.	ANNO DI RIFER.	TIPO DI VEICOLO	SEGMENTI
1	M. Scorrano et al.	2020	2019	ICEV, HEV, BEV	A, B, C, D, E
2	R. Danielis et al.	2018	2018	ICEV, BEV	A, B, C
3	A. Rusich	2015	2013	ICEV, HEV, BEV	A, B

È stata poi analizzata la pubblicazione a cura di Simone Franzò et al. [33], grazie alla quale è stato possibile avere un riscontro degli studi in altri Paesi europei, negli Stati Uniti e in Asia (Tabella 5). Si evince che la maggior parte degli studi opera un confronto tra i motori a combustione di tipo tradizionale, a benzina o diesel, e le auto elettriche. Una parte di questi introduce nell'analisi anche i veicoli ibridi, sia full che plug-in, mentre la trazione nei motori a GPL e a CNG è quella meno analizzata. È interessante notare che questi studi differiscono anche per la tipologia di prospettiva adottata, che può essere orientata al consumatore, come nella maggior parte dei casi, o orientata all'aspetto sociale (Tabella 6) [32]. I risultati differiscono poi a seconda del tipo di proprietà del veicolo, che può essere intestato ad una compagnia di leasing o ad un utilizzatore privato.

Tabella 5: Tipologia di trazione considerata [33]

TIPO DI TRAZIONE						NUMERO DI
<i>ICEV</i>	<i>HEV</i>	<i>PHEV</i>	<i>BEV</i>	<i>CNG</i>	<i>GPL</i>	PUBBLICAZIONI
X	X	X	X			6
X	X		X			4
X		X	X			3
X			X			2
X		X				1
X	X	X	X		X	1
X			X	X		1
X		X	X	X		1
X	X	X				1
X	X	X	X	X		1
X	X		X		X	1
X	X					1

I segmenti analizzati sono diversi e rilevanti ai fini del calcolo del TCO. Il segmento A è quello presente in quasi tutti gli studi, perché è quello che rappresenta il maggior numero di vendite in Italia e quindi una fetta importante del mercato. In alcuni casi è stato scelto come riferimento il segmento C, mentre in determinati studi non è stato specificato [33].

Il modello del TCO di tutti questi studi tiene conto del costo di acquisto e dei costi operativi, ma in alcuni casi non viene considerato il valore residuo al termine del periodo di proprietà. Tra i costi di acquisto è sempre presente il prezzo di listino, ma in una parte degli studi non vengono presi in considerazione gli incentivi e i costi di registrazione del veicolo. Tra i costi operativi è presente sempre il costo del carburante, mentre i costi assicurativi e di manutenzione non sono sempre presi in considerazione. Ulteriori elementi a completamento del modello sono i costi di parcheggio e autostradali, quelli della sostituzione delle batterie per le auto elettriche e gli interessi, come riportato in Tabella 7.

Tabella 6: Tipologia di modello adottato

MODELLO TCO ADOTTATO				
CONTRIBUTO	<i>CAPEX</i>	<i>OPEX</i>	<i>VALORE RESIDUO</i>	<i>PROSPETTIVA ADOTTATA</i>
1	X	X	X	Consumatore
2	X	X	X	Consumatore
3	X	X		Sociale

Tabella 7: Costi considerati in letteratura

CONTRIB.	ACQ.	INC.	IMMATR.	OPEX	PARCH.	INT.	SOC.
1	X	X	X	X			
2	X	X	X	X	X	X	
3	X	X	X	X			X

3.2 Formulazione del modello

Dall'analisi della letteratura, svolta in precedenza e dagli approfondimenti e dalle ricerche è stato possibile formulare un'espressione completa del TCO, che tiene conto di tutti i costi che vengono sostenuti durante la vita del veicolo. Dove non è stato possibile avere un valore preciso della spesa da sostenere, il valore è stato stimato grazie a report statistici, alle riviste specializzate del settore e infine ai forum di proprietari di auto. Il modello del TCO è rappresentato dall'equazione (1).

$$TCO = CAPEX + OPEX + Extra + Interessi - Valore Residuo \quad (1)$$

Dove:

- *CAPEX*: indica l'insieme dei costi che il proprietario sostiene quando acquista un'auto nuova;
- *OPEX*: sono i costi di mantenimento del veicolo e sono divisi in costi fissi e costi correlati al chilometraggio;
- *Extra*: sono i costi che vengono sostenuti dal proprietario del veicolo, ma solo in determinate circostanze;
- *Interessi*: rappresentano il compenso che si paga per il prestito di un capitale, qualora il bene sia acquistato mediante rateizzazione;
- *Valore Residuo*: è il valore del veicolo al termine del periodo di proprietà.

Di seguito sono descritte le singole voci che vanno a costituire ciascuna spesa.

3.2.1 CAPEX

Il primo contributo nel calcolo del TCO è rappresentato dai costi di acquisto, che sono i costi totali che si hanno quando si acquista un veicolo nuovo. I costi d'acquisto sono indicati nell'equazione (2):

$$CAPEX = Prezzo\ Auto - Sconti + Optional - Incentivi \\ + Costi\ di\ Immatricolazione \quad (2)$$

Il prezzo dell'auto è stato rilevato dal sito della casa automobilistica, per ciascun modello considerato. Analogamente per il prezzo degli sconti e degli optional, ove presenti. Per quanto riguarda la scontistica, la maggior parte delle case automobilistiche offre la possibilità di accedere agli sconti solo in caso di finanziamento stipulato con la casa automobilistica stessa; pertanto, non sono stati presi in considerazione nell'equazione (2). Gli incentivi fanno invece riferimento ai bonus emanati dal governo nel 2024 [34]. Tali fondi sono stati predisposti al fine di favorire la transizione energetica e quindi il rinnovo graduale del parco macchine italiano. Gli incentivi sono distinti in tre categorie:

- Auto con emissioni di CO_2 inferiori ai 20 g/km. Questa categoria comprende tutte le auto elettriche e alcune ibride plug-in;
- Auto con emissioni di CO_2 comprese tra i 21 g/km e i 60 g/km. Questa categoria comprende le auto ibride plug-in principalmente;
- Auto con emissioni di CO_2 comprese fra i 61 g/km e i 135 g/km. Questa categoria comprende tutti i modelli, dalle ibride a quelle diesel, ma anche alimentate a gas.

Il valore del bonus erogato dipende dall'ISEE, se inferiore o superiore ai 30.000 € e aumenta ulteriormente se si rottama un veicolo appartenente alle classi Euro 0, Euro 1 e Euro 2. Di seguito, nella Tabella 8 è riassunto quanto descritto in precedenza.

Tabella 8: Incentivi in funzione delle emissioni e dell'ISEE [34]

	ISEE < 30000	ISEE > 30000
<i>incentivi senza rottamazione [€]</i>		
0-20 g/km di CO2	7.500	6.000
21-60 g/km di CO2	5.000	4.000
61-135 g/km di CO2	0	0
<i>incentivi con rottamazione euro 0-2 [€]</i>		
0-20 g/km di CO2	13.750	11.000
21-60 g/km di CO2	10.000	8.000
61-135 g/km di CO2	3.000	3.000
<i>incentivi con rottamazione euro 3 [€]</i>		
0-20 g/km di CO2	12.500	10.000
21-60 g/km di CO2	7.500	6.000
61-135 g/km di CO2	2.000	2.000
<i>incentivi con rottamazione euro 4 [€]</i>		
0-20 g/km di CO2	11.250	9.000
21-60 g/km di CO2	6.875	5.500
61-135 g/km di CO2	1.500	1.500
<i>incentivi con rottamazione euro 5 [€]</i>		
0-20 g/km di CO2	8.000	-
21-60 g/km di CO2	5.000	-
61-135 g/km di CO2	-	-

Il limite massimo di spesa per accedere agli incentivi statali è di 35.000 €, IVA esclusa per le auto che hanno emissioni inferiori ai 20 g/km e per auto con emissioni comprese fra i 61 g/km e i 135 g/km, mentre è di 45.000 €, IVA esclusa, per le auto con emissioni comprese fra i 21 g/km e i 60 g/km. Tali valori, diventano rispettivamente 42.700 € nel primo caso e 54.900 € nel secondo. Inoltre, i beneficiari del bonus sono persone fisiche e giuridiche per le auto con emissioni inferiori a 60 g/km, mentre è destinato solo alle persone fisiche per tutti gli altri veicoli.

I costi di immatricolazione invece hanno la seguente espressione:

$$\text{Costi di Immatricolazione} = \text{IPT} + \text{Costi Amministrativi} + \text{Acquisto Targhe} \quad (3)$$

L'IPT (Imposta Provinciale di Trascrizione) è un'imposta provinciale che sancisce l'iscrizione del veicolo all'interno del Pubblico Registro Automobilistico, istituito per custodire gli atti di compravendita dei veicoli. Per i veicoli con meno di 53 kW l'IPT costa 151 €. Per i veicoli con potenza superiore, si aggiunge un importo supplementare, proporzionale al numero di kW e diverso a seconda della provincia in cui ci si trova. Nel caso specifico, Torino, l'IPT, riportata nell'equazione (3) avrà la seguente formulazione [35]:

$$IPT = IPT_{BASE} + 4,56 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \quad (4)$$

I costi amministrativi comprendono l'imposta di bollo per iscrizione al PRA, l'imposta di bollo per il rilascio della carta di circolazione, i diritti per la motorizzazione e gli emolumenti ACI. Infine, sono presenti i costi di acquisto delle targhe dal valore di 41,78 €.

Per le auto elettriche, sono state aggiunte delle voci, che tengono conto dei costi di acquisto e di installazione per le stazioni di ricarica domestica, come indicato nell'equazione (5).

$$\begin{aligned} CAPEX = & \text{Prezzo Auto} - \text{Sconti} + \text{Optional} - \text{Incentivi} \\ & + \text{Costi di Immatricolazione} + \text{Acquisto Wallbox} \\ & + \text{Installazione Wallbox} - \text{Bonus} \quad (5) \end{aligned}$$

Tale dispositivo deve essere installato in maniera conforme alla normativa, pertanto, si è deciso di aggiungere il costo di installazione della *Wallbox*, che nel caso di Torino risulta essere pari a 1.450 € considerando un'installazione di tipo comune, senza particolari criticità.

Infine, è presente un bonus noto come 'Bonus colonnine domestiche' che è un contributo a privati e condomini per l'acquisto e l'installazione di infrastrutture per la ricarica dei veicoli alimentati ad energia elettrica [36]. Tale contributo è pari all'80% del prezzo di acquisto e posa delle infrastrutture per un massimo di 1.500 € per gli utenti privati e fino a 8.000 € nel caso di installazione sulle parti comuni degli edifici condominiali.

3.2.2 OPEX

Gli OPEX sono i costi che vengono sostenuti dal proprietario per la gestione del veicolo. Sono divisi in costi indipendenti dal chilometraggio, i costi fissi, e costi proporzionali al chilometraggio, definiti costi variabili. Di seguito viene indicata la formulazione (6):

$$OPEX = \text{Bollo} + \text{Assicurazione} + \text{Costi Carburante} + \text{Manutenzione} \quad (6)$$

Il Bollo auto appartiene alla prima categoria poiché viene pagato anche qualora il veicolo non dovesse essere utilizzato. È una tassa automobilistica che sancisce il possesso del

veicolo ed è stabilita a livello regionale in Italia. Gli importi da pagare variano a seconda della regione di residenza e sono funzione della potenza del veicolo, espressa in kW , della categoria di veicolo e delle emissioni di CO_2 , ma anche dell'anno di immatricolazione e della tipologia di carburante. Per la regione Piemonte, valgono le seguenti regole [37]:

- Autoveicoli elettrici: esenzione permanente;
- Autoveicoli ibridi a benzina con Potenza inferiore a 100 kW : 5 anni di esenzione;
- Autoveicoli ibridi a gasolio, autoveicoli ibridi con Potenza superiore a 100 kW e auto a idrogeno: nessuna esenzione;
- Autoveicoli monovalenti a GPL o a CNG: esenzione permanente;
- Autoveicoli bi-fuel benzina/GPL o benzina/CNG: 5 anni di esenzione e al termine pagano rispettivamente 1/4 e 1/5 dell'importo calcolato;
- Autoveicoli trasformati a benzina/GPL o benzina/CNG dopo l'immatricolazione: 5 anni di esenzione e al termine pagano il totale dell'importo.

Per tutti i rimanenti veicoli con potenza inferiore ai 185 kW il Bollo si calcola con la formula (7):

$$Bollo = 2,58 * P(kW) \quad (7)$$

Esiste poi il Superbollo, per i veicoli con potenza che eccede i 185 kW che è pari ad un supplemento di 20 € per ciascun kW eccedente i 185 kW per un veicolo nuovo [38]. Con l'aumentare degli anni si ha diritto alle seguenti riduzioni:

- Al 60% dopo cinque anni dalla data di costruzione;
- Al 30% dopo dieci anni dalla data di costruzione;
- Al 15% dopo quindici anni dalla data di costruzione;

Il costo dell'assicurazione, RCA auto, è un costo obbligatorio che consiste in una polizza assicurativa che copre i danni causati a terzi in caso di incidente. Sono costi che includono il risarcimento a danni causati a cose e persone in base alla responsabilità del sinistro. Tale polizza viene stipulata con frequenza annuale e dipende da vari fattori. Primo fra tutti la cilindrata del veicolo, tanto più elevata tanto maggiore è il valore da pagare. Dipende inoltre dall'età e dal profilo assicurativo del conducente. Generalmente è più elevata per i neopatentati e per persone che sono considerate ad alto rischio. Infine, sono rilevanti la zona di residenza e la fascia di merito che è stabilita da un sistema bonus-malus. Tanto più alta la classe di merito, tanto più basso è il premio assicurativo. Il valore di assicurazione considerato comprende solo la copertura obbligatoria ed esclude tutte le ulteriori garanzie opzionali.

Successivamente si sono analizzati i costi relativi al carburante. Questi rientrano nei costi proporzionali al chilometraggio annuo del veicolo e variano localmente a seconda della tipologia di carburante considerato. Sono connessi ai consumi di un autoveicolo, pertanto variano a seconda dell'utilizzo, ma anche dello stile di guida dell'utilizzatore. Sono influenzati dalle condizioni climatiche, dalla tipologia di percorso e dal carico del veicolo. Un veicolo a pieno carico, in salita o imbottigliato nel traffico necessariamente consuma di più dello stesso veicolo che percorre una strada extraurbana con il solo carico del conducente. Per i prezzi del carburante si è fatto riferimento al sito del governo [39]. Poiché i prezzi variano nel corso dell'anno, si è preso come riferimento il valore medio riferito all'anno 2024 (Tabella 9).

Tabella 9: Tariffe carburanti riferite all'anno 2024 espresso in [€/l] o [€/kg] [39]

	Benzina	Diesel	GPL	CNG	Idrogeno
prezzo carburante	1,82125	1,7165	0,72416	1,33629	13,5

Per quanto riguarda le auto ibride plug-in il costo totale del carburante è rappresentato dalla somma del costo relativo al carburante del motore endotermico e del costo della corrente elettrica per ricaricare le batterie. Questo costo è stato stimato sulla base di simulazioni che prevedono il consumo in funzione della percentuale di utilizzo del motore elettrico, rispetto a quello a combustione.

Tabella 10: Tariffe di ricarica [€/kWh] in funzione dello scenario di ricarica [39]

	Tipo di ricarica			
	<i>Gratuita</i>	<i>Domestica</i>	<i>Lenta</i>	<i>Fast</i>
prezzo corrente	0	0,23455	0,65	0,84

Per le auto BEV invece la situazione è più complessa poiché sono presenti diversi scenari di ricarica (Tabella 10). Nel primo scenario si ipotizza di ricaricare l'auto grazie all'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili combinate con sistemi ad accumulo. In tale scenario, considerando l'investimento di un impianto fotovoltaico precedentemente realizzato dotato di batterie a sé stante, il costo di ricarica al kWh risulta essere pari a 0 €. In questo scenario rientrano anche tutti gli utilizzatori che, pur non disponendo di tale impianto, hanno la possibilità di ricaricare il proprio veicolo in maniera gratuita, per esempio sul posto di lavoro, oppure presso un supermercato, un centro commerciale o delle strutture ricettive. Considerando esclusivamente uno scenario di questo tipo, il costo di ricarica risulta essere

nullo. Nel secondo scenario invece si tiene conto della ricarica presso un'infrastruttura domestica, precedentemente descritta e che ricarica il veicolo seguendo quella che è la tariffa media di un'utenza comune. Nel terzo scenario si presume che l'utilizzatore, non potendo disporre di uno spazio ad uso esclusivo, ricarica quotidianamente il proprio veicolo presso una colonnina pubblica utilizzando la tariffa *Pay per Use*. Sono presenti degli abbonamenti, ma nella trattazione si è scelto di adottare un approccio più generico. Nel quarto scenario rientrano tutti gli utilizzatori che ricaricano il loro autoveicolo presso dei *fast charge*. Infine, esiste un quinto scenario, quello adottato per il calcolo generale del TCO: è uno scenario misto in cui si ipotizza di ricaricare il proprio veicolo adottando tutti i metodi sopra descritti in diversa percentuale di utilizzo.

Infine, si sono calcolati i costi di manutenzione che dipendono dalla tipologia di veicolo, dal carburante e dal chilometraggio. Sono più alti per i veicoli di segmento elevato, o per i marchi di lusso, mentre sono ridotti per le citycar e le utilitarie. Sono superiori nelle auto diesel e nelle auto ibride per via delle maggiori componenti rispetto alle auto a benzina. Tuttavia, i costi fissi più bassi si registrano per le auto elettriche, che oltre a disporre di meno componenti, sono più semplici ed economiche. Fanno parte di questi costi quelli relativi al tagliando, alla manutenzione straordinaria, al cambio gomme e alla revisione.

3.2.3 Extra

In questa categoria rientrano dei costi operazionali che però sono sostenuti solo in determinate circostanze e sono descritti dall'espressione (8):

$$Extra = Parcheggio + Pedaggi autostradali \quad (8)$$

I primi costi riguardano le tariffe da pagare per poter parcheggiare nelle strisce blu all'interno di un centro cittadino. Sono costi che variano in Italia in base alla città e alla zona in cui ci si trova. Si pagano in funzione delle ore in cui il veicolo resta parcheggiato e in funzione dell'orario. Generalmente, durante le ore notturne e nei giorni festivi, sono gratuiti. I secondi sono i costi autostradali relativi ai pedaggi e sono funzione della tratta percorsa e dalla tipologia di autostrada.

Pur essendo dei costi operativi si è scelto di separarli dai precedenti per due motivi principali. Primo fra tutti evidenziare come il loro peso sia diverso a seconda del tipo di veicolo considerato, ma anche perché non tutti i proprietari di veicoli si trovano a sostenere queste spese, come le persone che vivono in zone in via di sviluppo in cui le autostrade sono gratuite e i parcheggi sono liberi. Questi costi rappresentano un possibile spunto di riflessione per eventuali agevolazioni future.

3.2.4 Interessi

Gli interessi sono il costo del denaro preso in prestito e vengono espressi in percentuale del capitale iniziale. Sono interessi passivi poiché fanno riferimento ad un prestito bancario e vengono calcolati sul capitale residuo. Presentano la seguente formulazione (9):

$$I = C * r * t \quad (9)$$

Dove:

- C è l'importo del prestito;
- r è il tasso di interesse annuo;
- t è il tempo espresso in anni.

Nel caso specifico si è scelto di non calcolare il valore degli interessi, supponendo di pagare l'intero importo iniziale con un unico pagamento. Nel modello generale, per completezza, si è tenuto conto degli interessi. In questo modo si possono aggiungere in un secondo momento per effettuare ulteriori considerazioni.

3.2.5 Valore residuo

Il valore residuo di un veicolo è il valore che questo ha dopo un determinato periodo di tempo. È influenzato dal numero di anni del veicolo ma anche dal chilometraggio. Dipende inoltre dalle condizioni del veicolo, dall'allestimento, dal marchio e dal segmento di appartenenza. Il valore residuo è una percentuale del valore iniziale del veicolo che diminuisce negli anni. In questo periodo storico le auto, seppur datate hanno un valore residuo elevato, soprattutto se confrontato rispetto agli anni passati, per via dell'aumento del prezzo del nuovo. Tuttavia, alcune motorizzazioni sono comunque penalizzate e si svalutano più velocemente di altre. Per esempio, le auto Diesel subiscono una svalutazione maggiore di quelle a benzina per via dei blocchi del traffico nelle principali città italiane. Anche le auto elettriche subiscono una forte svalutazione dovuta principalmente alla tecnologia ancora emergente e in via di sviluppo, che rende obsoleti modelli con pochi anni di vita o dalle prestazioni non proprio ottimali. Nel caso delle auto elettriche la svalutazione è funzione anche del SoH (*State of Health*) che indica lo stato di conservazione della batteria del veicolo attraverso una percentuale che misura l'efficienza della batteria rispetto a quella originale. Esprime quindi la degradazione della batteria nel tempo e dipende dal numero di cicli di carica, dalla temperatura di utilizzo e dall'intensità di utilizzo.

In questa trattazione si è deciso di adottare la seguente svalutazione in sette anni di possesso del bene:

- 80% della svalutazione per le auto a combustione;

- 88% per le auto BEV che usufruiscono degli incentivi e appartengono ai segmenti A, B e C;
- 80% per le auto BEV di segmento D ed E. [40]

3.3 Attualizzazione dei costi

Dalla descrizione condotta in precedenza si osservano i diversi contributi al TCO espressi nell'equazione (10).

$$TCO = CAPEX + OPEX + Extra + Interessi - Valore Residuo \quad (10)$$

Al fine di ottenere un'analisi più precisa e aderente alla realtà, che tenga conto anche di aspetti finanziari e dell'incertezza dovuta a fattori esterni, è necessario attualizzare i costi. Infatti, mentre il CAPEX viene sostenuto dal proprietario all'acquisto del veicolo, previa ipotesi di pagamento in un'unica soluzione, gli OPEX e gli Extra sono distribuiti nel corso degli anni di possesso del bene oggetto di studio. Pertanto, per evitare di sovrastimare l'impatto economico di queste componenti è necessario attualizzare i costi e trasformare il denaro che viene speso a lungo termine. In questo modo i flussi di cassa saranno confrontabili e il denaro avrà lo stesso valore.

La formula di attualizzazione adottata per gli OPEX e gli Extra risulta essere la seguente (11):

$$PV = \frac{FV_t}{(1 + r)^t} \quad (11)$$

Dove:

- PV è il valore attuale, noto anche come *Present Value*;
- FV_t è il valore futuro generato al tempo t ;
- r è il tasso di attualizzazione;
- t è il tempo di possesso del bene espresso in anni.

Nel caso specifico il tasso di attualizzazione r vale 4,45% [41].

CAPITOLO 4: SVILUPPO DELLE METODOLOGIE

Il caso studio

Il modello definito nel capitolo precedente è stato impiegato nel Caso Studio. Si tratta di un'analisi basata su 16 diversi autoveicoli appartenenti a diversi segmenti. Sono modelli di riferimento che si differenziano per tipologia di alimentazione, allestimento e marchio. Il fine di questo studio è comprendere quale auto ha il TCO più basso all'interno del proprio segmento, ma anche l'incidenza dei singoli costi sul valore totale. Inoltre, si vuole valutare la convenienza delle forme alternative di trazione rispetto a quelle tradizionali, tenendo conto di aspetti pratici, come le spese di manutenzione e degli effetti degli incentivi che possono rendere una forma di trasporto più competitiva di un'altra.

L'analisi è stata condotta a Torino, quindi si è tenuto conto delle indicazioni generali riportate sul sito del Comune di Torino e della Regione Piemonte. L'analisi è stata svolta su Excel e su MATLAB.

4.1 I veicoli in esame

Lo studio si basa su 16 diversi modelli di autoveicolo (Tabella 11) così suddivisi:

- Tre veicoli appartenenti al segmento A (Figura 27);
- Tre veicoli appartenenti al segmento B (Figura 28);
- Tre veicoli appartenenti al segmento C (Figura 29);
- Tre veicoli appartenenti al segmento D (Figura 30);
- Quattro veicoli appartenenti al segmento E (Figura 31).

In ciascuna di queste categorie è presente un'auto dotata di motore tradizionale a combustione, un'auto ibrida e un'elettrica. Fa eccezione il segmento E, quello delle berline di lusso di grandi dimensioni, in cui è presente un ulteriore autoveicolo a celle a combustibile alimentato a idrogeno. Non sono presenti auto a metano perché al momento dell'analisi nessuna casa madre produce un veicolo a metano da immatricolare come nuovo.

Tabella 11: Elenco dei veicoli in esame nel caso studio [42]

SEGMENTO	MARCA	MODELLO	ALIMENTAZIONE	ALLESTIMENTO
A	HYUNDAI	I 10	Benzina	1.0 MPI Connectline
A	FIAT	Panda	Mild hybrid	1.0 Hybrid
A	DACIA	Spring	Elettrica	Expression 65
B	RENAULT	Clio	Benzina/GPL	1.0 TCe Evolution
B	TOYOTA	Yaris	Full hybrid benzina	1.5 Hybrid Active
B	PEUGEOT	E-208	Elettrica	e-208 136 CV Style
C	VOLKSWAGEN	Golf	Benzina	1.5 TSI ACT 150CV Life
C	PEUGEOT	308	Ibrida plug-in benzina	1.6 Hybrid 181 CV Active Pack EAT8
C	VOLKSWAGEN	Id.3	Elettrica	Pure
D	ALFA ROMEO	Giulia	Diesel	2.2 Turbo 211 CV Sprint Q4
D	MERCEDES	C	Ibrida plug-in diesel	300 de Advanced
D	TESLA	Model 3	Elettrica	Standard Range
E	MERCEDES	E	Diesel	200 d
E	AUDI	A6	Full hybrid diesel	35 TDI S tronic
E	BMW	Serie 5	Elettrica	i5 eDrive40
E	TOYOTA	Mirai	Idrogeno	Fuel cell Essence



Figura 27: Segmento A: Hyundai i10, Fiat Panda, Dacia Spring [42]



Figura 28: Segmento B: Renault Clio, Toyota Yaris, Peugeot e-208 [42]



Figura 29: Segmento C: Volkswagen Golf, Peugeot 308, Volkswagen ID.3 [42]



Figura 30: Segmento D: Alfa Romeo Giulia, Mercedes C, Tesla Model 3 [42]



Figura 31: Segmento E: Mercedes E, Audi A6, BMW Serie 5, Toyota Mirai [42]

L'allestimento preso in esame per tutti i veicoli è l'allestimento base e si è fatto riferimento al sito delle case madri per avere indicazioni precise sulla scontistica e sulle dotazioni. Non sono stati aggiunti optional di nessun tipo, ad eccezione per i veicoli elettrici nel caso in cui non fossero dotati degli equipaggiamenti necessari e fondamentali per la ricarica, come i caricatori di tipo 2.

Per ogni vettura sono stati estrapolati dalle schede tecniche dei valori di riferimento (Tabella 12), come il prezzo, la potenza espressa in CV e in kW, il valore delle emissioni e il consumo medio espresso in l/100 km per le ICEV, kWh/100 km per le BEV e kg/100 km per le auto alimentate ad idrogeno. Questi consumi fanno riferimento allo standard europeo ed internazionale noto come WLTP (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*).

Tabella 12: Elenco delle caratteristiche tecniche di ciascun autoveicolo [42]

MODELLO	PREZZO [€]	POTENZA [CV]	POTENZA [KW]	EMISS. [g/km]	CONSUMO MEDIO
I 10	17.900	63	46	114/119	5,1
Panda	15.900	70	52	113/116	5
Spring	18.900	65	48	0	13,2
Clio	19.050	101	74	108	7
Yaris	24.550	116	85	92	4,1
E-208	35.080	136	100	0	15,4
Golf	32.350	150	110	123	5,4
308	40.350	181	133	23	1,3
Id.3	36.490	170	125	0	15,2
Giulia	55.500	211	155	144/148	5,5
C	68.098	313	230	11	2,8
Model 3	42.975	283	208	0	13,2
E	64.883	163	120	141/123	4,7
A6	58.950	163	120	137	5,2
Serie 5	74.400	340	250	0	15,9
Mirai	75.900	182	134	0	0,8

4.2 Condizioni al contorno

Per ogni veicolo si sono calcolati i costi di immatricolazione e il CAPEX, che viene indicato nella Tabella 13. Il calcolo tiene conto di un incentivo pari a 6.000 € per le auto elettriche che accedono all'incentivo e 4.000 € per le auto plug-in ibride.

Tabella 13: Calcolo del CAPEX per ciascun autoveicolo usando l'equazione (2)

MODELLO	CAPEX [€]
I 10	17.039,033
Panda	15.643,79
Spring	12.133,62
Clio	19.743,79
Yaris	25.243,79
E-208	30.948,01
Golf	33.289,103
308	34.543,79
Id.3	32.011,01
Giulia	56.597,053
C	68.791,79
Model 3	44.643,01
E	65.857,203
A6	59.643,79
Serie 5	75.072,27
Mirai	75.478,1

Per le auto elettriche, nel calcolo del CAPEX si è tenuto conto della spesa necessaria per l'acquisto e l'installazione di un'infrastruttura per la ricarica domestica. Nel caso specifico è stata scelta la *Wallbox Pulsar Max* in grado di erogare fino a 22 kW e dal costo di 738,01 € [43]. In Figura 32 è riportata una rappresentazione grafica del contenuto della Tabella 13

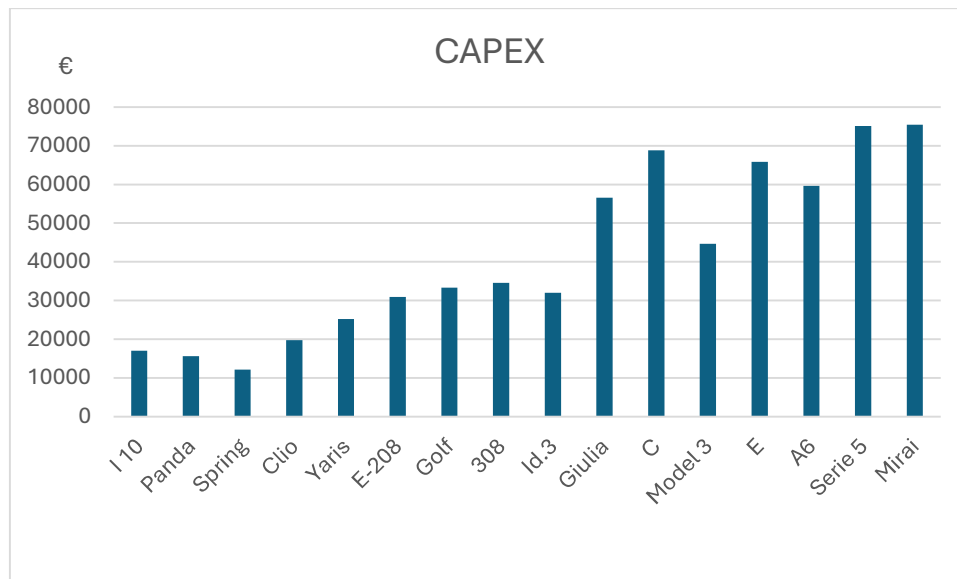


Figura 32: Diagramma a barre rappresentante il CAPEX riportato in Tabella 13

Successivamente si sono calcolati gli OPEX, secondo l'equazione (6) (si veda Tabella 14 e Figura 35). Per ciascun autoveicolo si sono quantificati i costi variabili e i costi fissi. Nei costi fissi sono stati inseriti il Bollo, i costi assicurativi e i costi di manutenzione. Per i costi assicurativi, non avendo un importo preciso, si è inserito un valore indicativo che tiene conto del segmento del veicolo e della zona in cui è stata condotta l'analisi. Si è ipotizzato come proprietario del veicolo un uomo di 40 anni, residente a Torino [44] e in prima classe di merito. In questo modo il costo assicurativo è uguale per veicoli che appartengono allo stesso segmento.

È stato poi calcolato il costo relativo al carburante che dipende dal chilometraggio annuo. Come valore di riferimento si è scelto di adottare per tutti gli autoveicoli un chilometraggio pari a 20.916 km, che è il chilometraggio medio annuale di un veicolo in Italia [45]. Si è ipotizzato uno scenario che prevede il 60% dei chilometri percorsi in città, il 30% dei chilometri percorsi in strade extraurbane e il 10% in autostrade, come rappresentato in Figura 33.

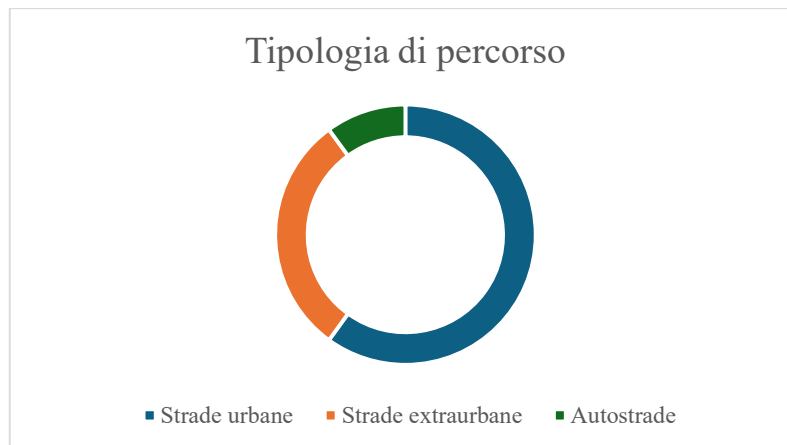


Figura 33: Diagramma a torta che indica la tipologia di percorso considerato

In questo modo si è ottenuto il numero di litri in un anno necessari per ciascuna vettura di tipo ICEV e i kg di idrogeno per la FCEV. Per le auto ibride plug-in si è ipotizzato di utilizzare l'auto per il 50% in modalità elettrica e per il 50% in modalità endotermica. Per le auto elettriche si è scelto di adottare uno scenario di ricarica generale come rappresentato in Figura 34:

- 10% di ricarica presso un'utenza gratuita;
- 60% di ricarica presso l'utenza domestica;
- 20% di ricarica presso una colonnina pubblica di tipo lento;
- 10% di ricarica presso una colonnina di tipo fast.

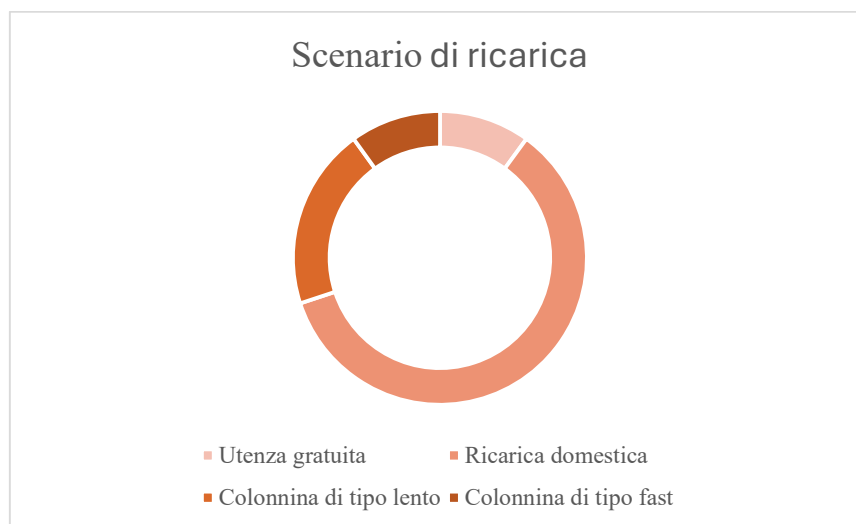


Figura 34: Rappresentazione dello scenario di ricarica nel caso studio

Per i costi di manutenzione è stato complesso quantificare in maniera esatta l'importo, poiché la manutenzione, così come i costi assicurativi, dipendono da molteplici fattori. Ci si è basati su delle statistiche [46] che definiscono il prezzo medio di un tagliando per ciascun marchio a cui si è sommato un ulteriore termine che tiene conto dell'usura e della tipologia di veicolo. In Appendice A è riportata una tabella indicativa di alcuni valori di riferimento.

Questo termine è tanto più alto per i veicoli appartenenti ai marchi di lusso o con una motorizzazione più complessa, mentre è più basso per i veicoli a benzina. Per le BEV non è presente una vera e propria statistica in quanto tali veicoli si stanno diffondendo negli ultimi anni e le tecnologie sono ancora in via di sviluppo e differenti tra marchi diversi. Si è quindi adottato un approccio che sancisce che in media la manutenzione di un BEV è il 35% inferiore rispetto a quella di un ICEV di pari segmento e di marchio analogo.

Tabella 14: Calcolo degli OPEX secondo l'equazione (6)

OPEX [€]			
MODELLO	COSTI VARIABILI	COSTI FISSI	TOTALE
I 10	11.551,83	5.523,93	17.075,76
Panda	11.325,32	5.089,65	16.414,97
Spring	5.359,98	4.491,99	9851,97
Clio	6.304,40	5.860,88	12.165,27
Yaris	9.286,76	5.775,58	15.062,35
E-208	6.253,31	5.195,07	11.448,38
Golf	12.231,35	8.746,72	20.978,07
308	10.950,57	8.678,34	19.628,90
Id.3	6.172,10	6.122,11	12.294,21
Giulia	11.741,34	10.691,09	22.432,43
C	9.262,39	9.848,29	19.110,68
Model 3	5.359,98	6.852,59	12.212,57
E	10.033,51	13.804,31	23.837,81
A6	11.100,90	13.117,33	24.218,23
Serie 5	6.456,34	8.651,55	15.107,89
Mirai	13.431,82	10.799,90	24.231,72

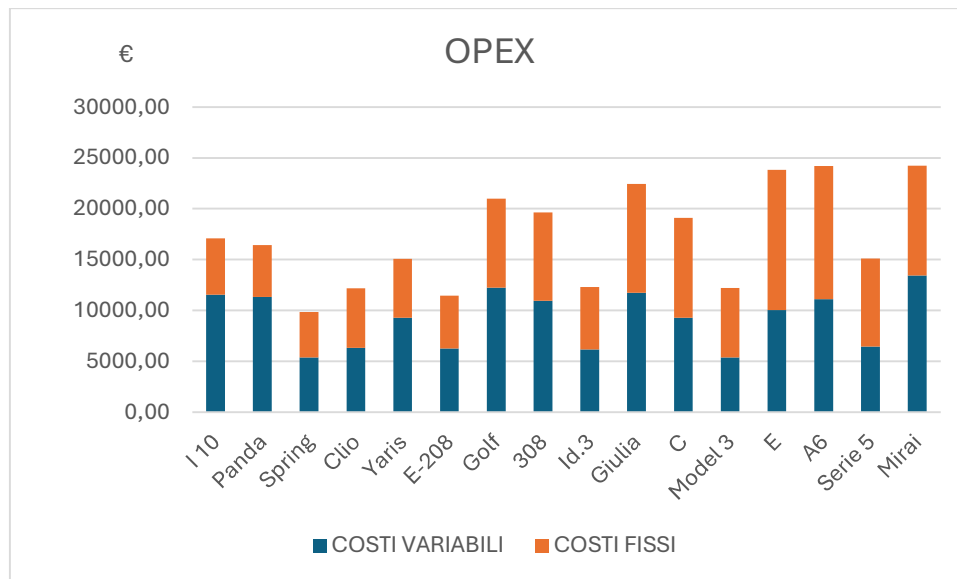


Figura 35: Rappresentazione degli OPEX riportati in Tabella 14

I costi extra sono stati calcolati in funzione del chilometraggio, per i costi autostradali, e in funzione delle ore di stazionamento per i costi del parcheggio. Si sono adottate le stesse ipotesi per tutti gli autoveicoli; pertanto, questi costi hanno un importo fisso. Per la città di Torino le tariffe di parcheggio variano da 1,50 €/h a 2,50 €/h. Si è scelto di considerare un veicolo che sosta 1 ora al giorno in una zona in cui la tariffa è $1,70 \frac{\text{€}}{\text{h}}$, per un totale di 304 giorni feriali. Per i costi autostradali, essendo variabili a seconda della tratta percorsa, si è deciso di considerare un importo medio pari a $0,1 \frac{\text{€}}{\text{km}}$. Con le ipotesi fatte, il valore totale dei Costi Extra, calcolato con l'equazione (8), durante tutto il periodo di vita utile del bene risulta essere il seguente.

$$\text{Costi Extra} = 4.316,63 \text{ €} \quad (12)$$

Anche il valore residuo è stato calcolato seguendo le statistiche (Tabella 15). Dopo 7 anni e con un chilometraggio annuale medio pari a 20.916 km si è stabilito che ciascun autoveicolo abbia un valore residuo pari al 20% del prezzo di partenza per i veicoli dotati di motori a combustione e per le BEV appartenenti ai segmenti D ed E, mentre un valore pari al 12% per le rimanenti, che subiscono una maggiore svalutazione a causa degli incentivi. Questi alterano il mercato e contribuiscono alla svalutazione del bene.

Tabella 15: Calcolo del Valore Residuo secondo le statistiche per ciascun modello

MODELLO	VALORE RESIDUO [€]
I 10	3.580
Panda	3.180
Spring	2.268
Clio	3.810
Yaris	4.910
E-208	4.209,6
Golf	6.470
308	8.070
Id.3	4.378,8
Giulia	11.100
C	13.619,6
Model 3	8.595
E	12.976,6
A6	11.790
Serie 5	14.880
Mirai	15.180

4.3 Calcolo del TCO

Con i valori ottenuti in precedenza e con quanto asserito nell'equazione (10), è stato calcolato il costo totale di proprietà. Con un tempo di possesso del bene pari a sette anni, con le condizioni al contorno descritte nel paragrafo precedente e con le attualizzazioni dei costi, si sono ottenuti i seguenti risultati riportati in Tabella 16.

Tabella 16: Calcolo del TCO per i modelli in esame secondo l'equazione (10)

MODELLO	TCO [€]
I 10	34.851,42
Panda	33.195,39
Spring	24.034,22
Clio	32.415,70
Yaris	39.712,77
E-208	42.503,42
Golf	52.113,80
308	50.419,33
Id.3	44.243,05
Giulia	72.246,11
C	78.599,51
Model 3	52.577,21
E	81.035,05
A6	76.388,65
Serie 5	79.616,79
Mirai	88.846,45

È interessante notare che, al netto degli incentivi, per il segmento A il veicolo con il TCO più basso è la Dacia Spring. Nel segmento B, invece l'auto più conveniente risulta essere la Renault Clio con alimentazione a GPL, con una differenza di circa 10.000 € sul totale, rispetto al BEV di pari segmento. Questo risultato è imputabile principalmente a due fattori: il prezzo di listino più basso per l'utilitaria della Renault e l'alimentazione a GPL che sui lunghi chilometraggi consente di abbattere notevolmente i costi variabili dovuti al carburante. Nel segmento C, risulta vantaggiosa la Volkswagen ID.3 che rispetto alla Volkswagen Golf presenta un distacco di 7.870,75 €. Il divario aumenta ulteriormente nel segmento D, dove la Tesla Model 3 presenta un TCO di quasi 20.000 € più basso rispetto all'Alfa Romeo Giulia equipaggiata con motore diesel. Infine, il segmento E in cui l'auto più conveniente risulta essere l'Audi A6 equipaggiata di motore *Full Hybrid* Diesel. La BMW i5 elettrica risulta poco più sconveniente nell'utilizzo con un TCO superiore di 3.228 €. La Toyota Mirai risulta essere la meno conveniente tra le quattro berline con un costo totale di proprietà elevato. Ciò è ancora più evidente nel grafico riportato in Figura 36.

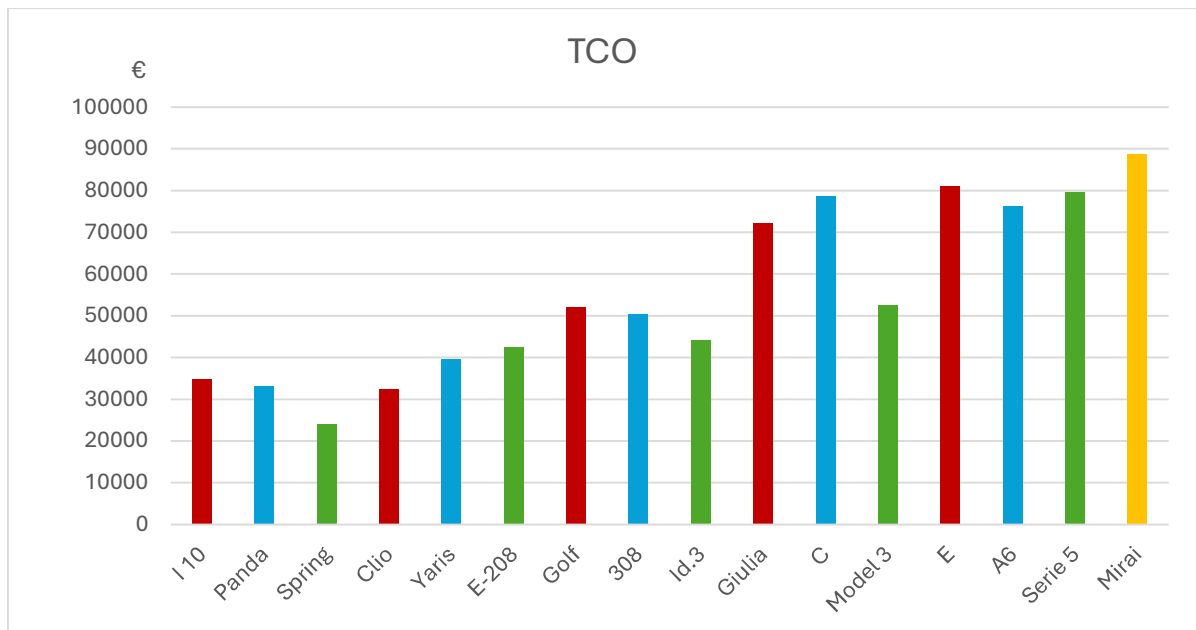


Figura 36: Rappresentazione del TCO su istogramma in funzione della tipologia di trazione.

In Rosso sono indicati i veicoli con alimentazione di tipo tradizionale, in Azzurro gli autoveicoli alimentati con motore ibrido, in Verde i BEV e in Arancione la Toyota Mirai alimentata ad idrogeno.

In tutte le analisi le auto *plug-in Hybrid* risultano sconvenienti per via del maggiore costo di acquisto, rispetto al veicolo ICE corrispondente. Rappresentano, tuttavia, un buon compromesso nella riduzione dell'inquinamento nei centri abitati e sono la scelta giusta per chi vuole avvicinarsi all'elettrico, come stile di guida e abitudini, evitando la *range anxiety*, ovvero l'ansia legata alla ridotta autonomia dei BEV. Permettono, di accedere comunque a numerose agevolazioni fiscali ed economiche e svolgono un ruolo fondamentale nella transizione energetica.

4.4 Calcolo dell'Incidenza

Si è calcolata l'incidenza dei principali contributi sul TCO. In questo modo si può valutare l'impatto delle singole voci di costo sul totale e, a parità di condizioni al contorno sulle diverse tipologie di alimentazione nel periodo di possesso.

L'analisi è iniziata con il calcolo dell'incidenza del prezzo di listino sul totale. Si trascurano quindi tutti gli incentivi, gli sconti e le spese di immatricolazione per osservare le principali differenze di prezzo. Si è usata l'espressione (13):

$$i_{prezzo} = \frac{\text{Prezzo}}{\text{TCO}} * 100 \quad (13)$$

Tabella 17: Calcolo dell'incidenza del prezzo di acquisto sul totale del TCO secondo equazione (13)

MODELLO	INCIDENZA PREZZO
I 10	51,36%
Panda	47,90%
Spring	78,64%
Clio	58,77%
Yaris	61,82%
E-208	82,53%
Golf	62,08%
308	80,03%
Id.3	82,48%
Giulia	76,82%
C	86,64%
Model 3	81,74%
E	80,07%
A6	77,17%
Serie 5	93,45%
Mirai	85,43%

Dalla Tabella 17 si osserva che per tutti i veicoli BEV e *plug-in hybrid* considerati, l'incidenza del prezzo di listino sul totale è superiore rispetto a quella dei veicoli endotermici corrispondenti, a causa della presenza del costo della batteria. Grazie agli incentivi all'acquisto di un'auto elettrica, a cui accedono i veicoli di segmento A, B e C, e degli sconti la situazione cambia a vantaggio dei BEV e l'incidenza diminuisce, come riportato in Tabella 18.

Tabella 18: Calcolo dell'incidenza del CAPEX sul TCO per ciascun veicolo

MODELLO	INCIDENZA CAPEX
I 10	48,89%
Panda	47,13%
Spring	50,48%
Clio	60,91%
Yaris	63,57%
E-208	72,81%
Golf	63,88%
308	68,51%
Id.3	72,35%
Giulia	78,34%
C	87,52%
Model 3	84,91%
E	81,27%
A6	78,08%
Serie 5	94,29%
Mirai	84,95%

Si evince una diminuzione del CAPEX e quindi una conseguente riduzione del divario con le auto endotermiche.

Tuttavia, è interessante approfondire anche l'incidenza dei costi operativi che vengono sostenuti durante tutto il periodo di proprietà del bene, riportati in Tabella 19.

Tabella 19: Calcolo dell'incidenza degli OPEX sul TCO per ciascun veicolo

INCIDENZA			
MODELLO	COSTI VARIABILI	COSTI FISSI	TOTALE
I 10	33,15%	15,85%	49,00%
Panda	34,12%	15,33%	49,45%
Spring	22,30%	18,69%	40,99%
Clio	19,45%	18,08%	37,53%
Yaris	23,38%	14,54%	37,93%
E-208	14,71%	12,22%	26,94%
Golf	23,47%	16,78%	40,25%
308	21,72%	17,21%	38,93%
Id.3	13,95%	13,84%	27,79%
Giulia	16,25%	14,80%	31,05%
C	11,78%	12,53%	24,31%
Model 3	10,19%	13,03%	23,23%
E	12,38%	17,03%	29,42%
A6	14,53%	17,17%	31,70%
Serie 5	8,11%	10,87%	18,98%
Mirai	15,12%	12,16%	27,27%

Per i veicoli endotermici i costi variabili, dovuti alla spesa di carburante, impattano notevolmente andando a costituire fino al 30% del TCO per i veicoli di segmento A. L'impatto, sugli altri segmenti, è minore, passando da un valore pari al 20% circa per le auto a GPL, fino al 12% per i veicoli di segmento E. Per i BEV, dato il costo dell'energia inferiore, si ha una maggiore convenienza sul lungo periodo e per elevati chilometraggi e l'impatto dei costi della ricarica sul totale è notevolmente inferiore, con valori compresi tra il 22% circa per il segmento A e l'8% per il segmento E. Anche i costi fissi, generalmente per i veicoli elettrici a batteria, impattano meno sul totale a causa delle riduzioni dei costi amministrativi, delle agevolazioni e della manutenzione meno onerosa che rappresenta un'ulteriore punto di forza dei veicoli elettrici.

Infine, si è calcolato il peso dei costi Extra sul TCO, riportato in Tabella 20.

Tabella 20: Calcolo dell'incidenza dei costi Extra sul TCO per ciascun veicolo

MODELLO	INCIDENZA EXTRA
I 10	12,39%
Panda	13,00%
Spring	17,96%
Clio	13,32%
Yaris	10,87%
E-208	10,16%
Golf	8,28%
308	8,56%
Id.3	9,76%
Giulia	5,97%
C	5,49%
Model 3	8,21%
E	5,33%
A6	5,65%
Serie 5	5,42%
Mirai	4,86%

È immediato osservare che il peso dei costi Extra è tanto più elevato per i veicoli più economici, mentre risulta di minore impatto per i veicoli che hanno un TCO elevato. Tale risultato era prevedibile, dal momento che si è ipotizzato un costo fisso per tutti i veicoli in esame.

Le considerazioni fatte in questo paragrafo sono state raffigurate nel diagramma a barre riportato in Figura 37.

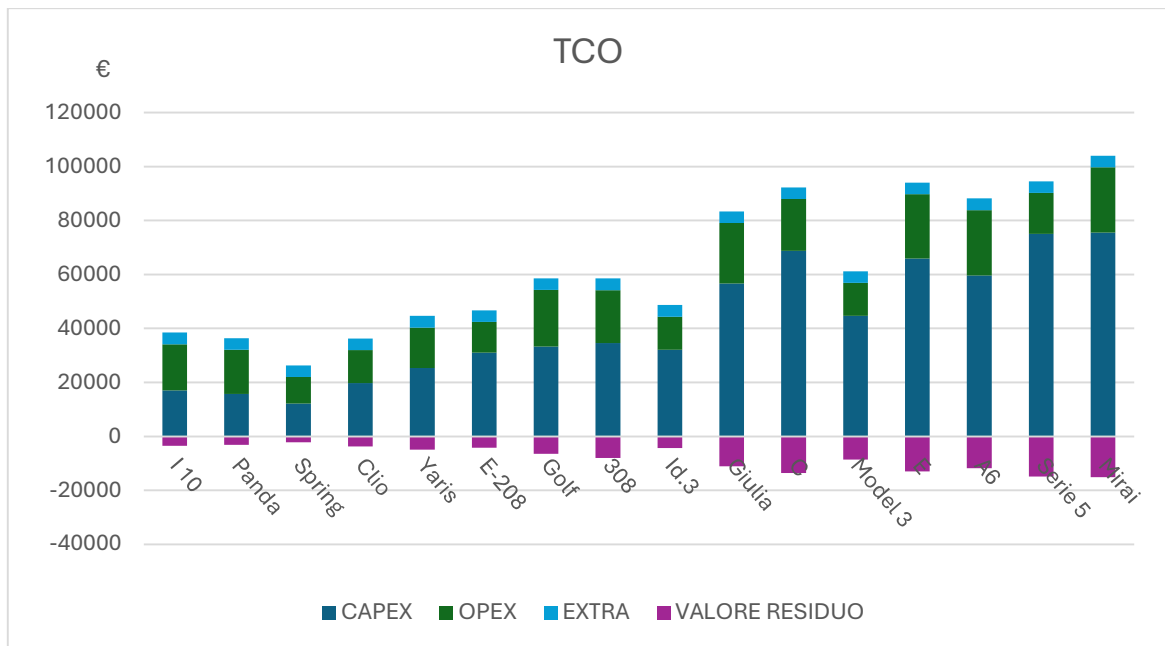


Figura 37: Rappresentazione dei singoli contributi nel calcolo del TCO

Dal diagramma è possibile osservare il peso di ciascuna componente sul TCO. Ogni contributo è evidenziato con un colore diverso. Nello specifico in blu è raffigurato il CAPEX, in verde l'OPEX, in azzurro i costi Extra, mentre in viola il Valore Residuo. Questo contributo è negativo perché è la componente che si sottrae al termine del periodo di proprietà.

4.5 Analisi di sensitività

Lo studio è proseguito con l'analisi di sensitività per le auto elettriche. In questo modo si può valutare l'impatto che alcune variazioni su dei parametri hanno sul TCO. Si è condotta un'analisi di sensitività *One at a Time*, in cui si fa variare una variabile alla volta, lasciando costanti tutti gli altri parametri. I due parametri che hanno subito la variazione sono lo scenario di ricarica utilizzato e l'importo dell'incentivo all'acquisto. Non è stato possibile realizzare un'analisi di sensitività multivariata perché sui cinque modelli BEV analizzati, solo tre di essi, accedono all'incentivazione.

4.5.1 Variazione dello scenario di ricarica

Con questa analisi l'obiettivo è determinare la variazione del TCO per i cinque BEV analizzati. Si è deciso di far variare la tariffa di ricarica da un minimo di 0 €/kWh ad un massimo di 0,84 €/kWh. Lasciando invariate le altre condizioni al contorno, lo scenario diventa quello riportato in Tabella 21:

Tabella 21: Analisi di sensitività - variazione del TCO dei BEV in funzione dello scenario di ricarica adottato

MODELLO	TCO [€]			
	0	0,23455	0,65	0,84
	[€/kWh]	[€/kWh]	[€/kWh]	[€/kWh]
Spring	18.525	22.347	29.119	32.216
e-208	35.624	40.084	47.984	51.597
ID.3	37.502	41.904	49.702	53.268
Model 3	45.922	49.745	56.516	59.613
serie 5	71.868	76.473	84.629	88.359

È evidente che le auto elettriche hanno un TCO più basso nel caso di scenario 1 e quindi con tariffa di ricarica gratuita. Questo dato era prevedibile, dal momento che permette l'esclusione dagli OPEX dei costi relativi alla ricarica delle batterie. A parità di incentivo, nei segmenti A e D, pur adottando la tariffa di ricarica più costosa, il BEV risulta l'alternativa più conveniente, con un costo totale di proprietà inferiore. Nei segmenti B ed E, invece, l'auto risulta più conveniente della corrispettiva ibrida solo nel caso della ricarica gratuita. Nel segmento C, il BEV risulta conveniente anche adottando una tariffa di ricarica pari a 0,65 €/kWh. Nel diagramma in Figura 38 è raffigurata la variazione del costo totale di proprietà in funzione della tariffa di ricarica.

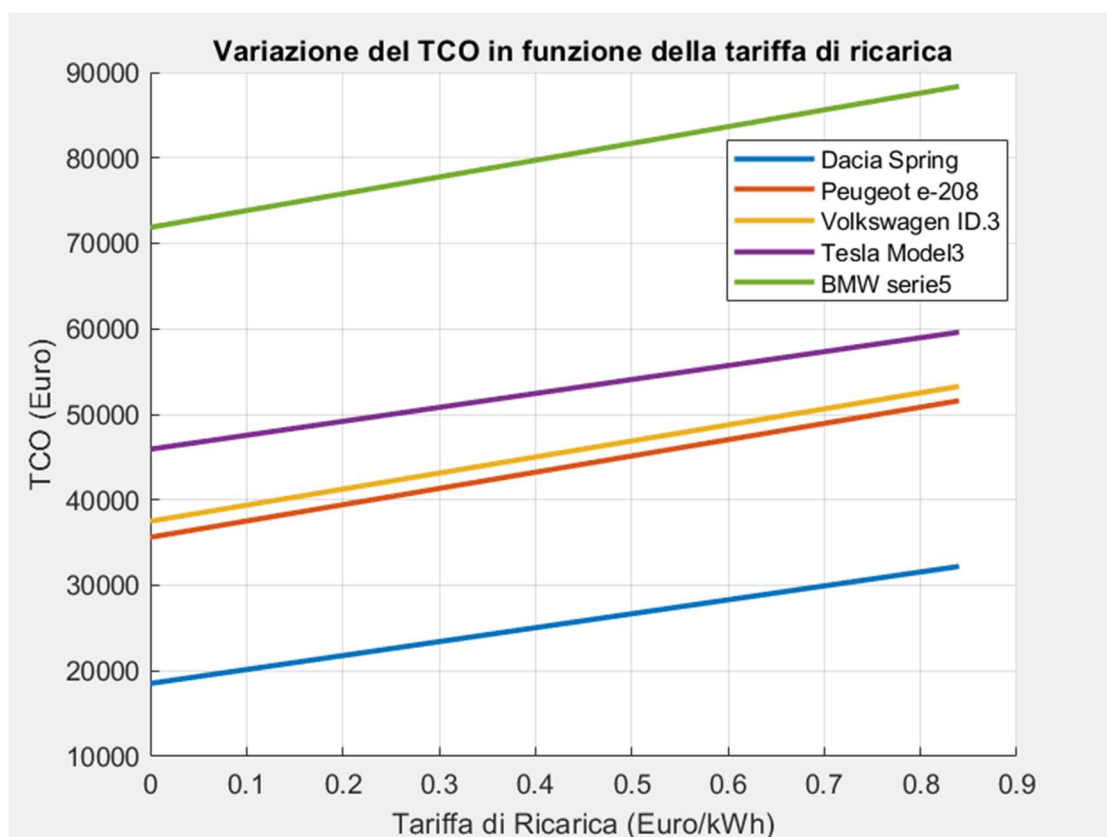


Figura 38: Analisi di sensitività - variazione del TCO dei BEV in funzione dello scenario di ricarica adottato

In generale si osserva che tutti i veicoli in esame hanno una componente fissa e una variabile. La prima rimane costante, mentre la seconda, relativa ai costi dipendenti dal chilometraggio, è rappresentata dalla pendenza della retta, che risulta di maggiore pendenza per i veicoli che hanno un consumo medio dichiarato più elevato.

4.5.2 Variazione dell'incentivo

Nel secondo caso si è scelto di far variare l'incentivo all'acquisto. Tale importo è compreso tra un minimo di 0 € nel caso in cui non si hanno i requisiti per accedere all'incentivo, fino ad un massimo di 13.750 €, nel caso in cui si aggiunge la rottamazione di un veicolo inquinante di tipo euro 0,1,2, come descritto nel capitolo 3.2.1. È interessante analizzare la variazione dell'incentivo per stabilire la convenienza di un BEV nelle medesime condizioni di un ICEV. L'analisi è stata condotta sui veicoli che usufruiscono nel caso base di un incentivo pari a 6.000 € quali: Dacia Spring, Peugeot e-208 e Volkswagen ID.3.

Con le ipotesi dette in precedenza, lasciando invariate le altre condizioni al contorno i risultati sono visibili in Tabella 22.

Tabella 22: Analisi di sensitività -variazione del TCO dei BEV in funzione dell'incentivo

	Incentivo [€]								
	0	6.000	7.500	8.000	9.000	10.000	11.250	12.500	13.750
Dacia Spring	30.034	24.034	22.534	22.034	21.034	20.034	18.784	17.534	16.284
Peugeot e-208	48.503	42.503	41.003	40.503	39.503	38.503	37.253	36.003	34.753
Volkswagen ID.3	50.243	44.243	42.743	42.243	41.243	40.243	38.993	37.743	36.493

La Dacia Spring si conferma la citycar più conveniente in ogni scenario analizzato, con un TCO più basso anche nel caso di incentivo pari a 0 €. Tra le utilitarie, nonostante un importo massimo di 13.750 €, il veicolo con il costo totale di proprietà più basso tra quelli analizzati rimane la Renault Clio alimentata a GPL. L'incentivo massimo permette però alla Peugeot-e208 di raggiungere la seconda posizione in termini di convenienza superando la Toyota Yaris Hybrid. Nel segmento C la Volkswagen ID.3 risulta quella con il TCO più basso sia rispetto alla Golf alimentata a benzina, che alla Peugeot 308 plug-in hybrid. Ciò è messo in evidenza in Figura 39.

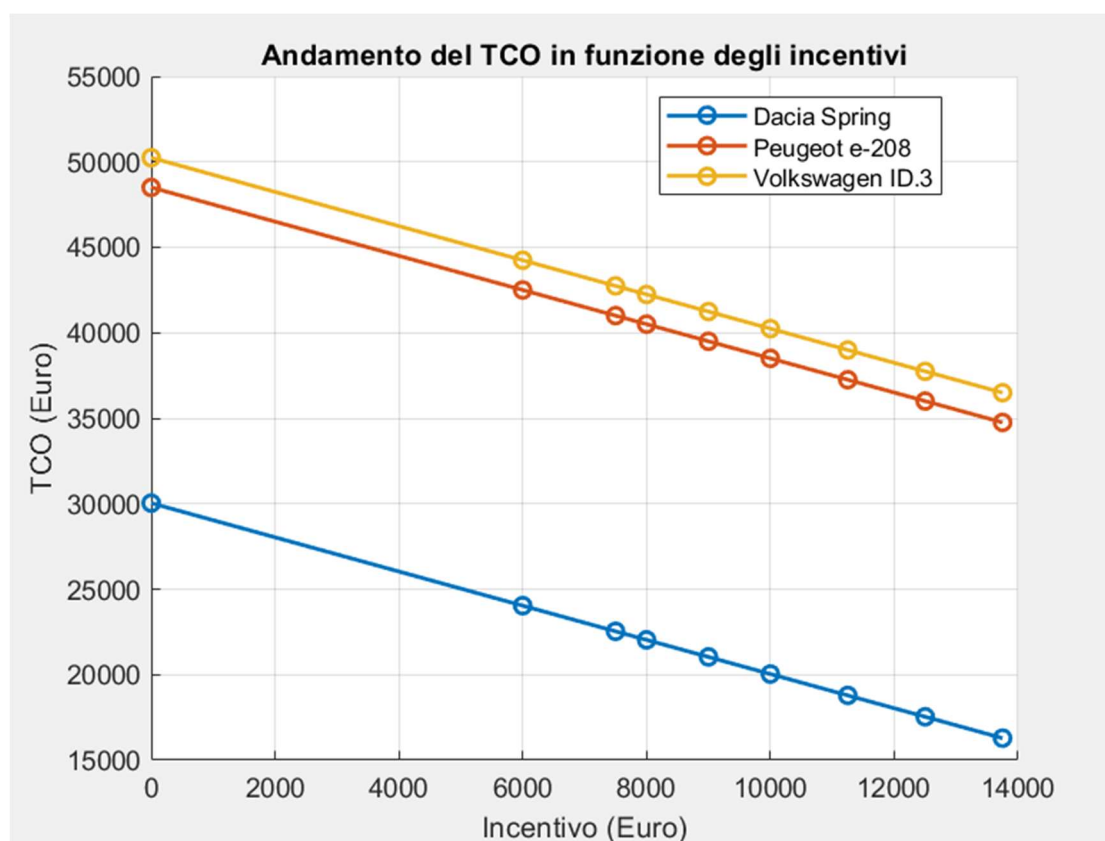


Figura 39: Analisi di sensitività – variazione del TCO dei BEV in funzione degli incentivi

Quindi, si può concludere che gli incentivi consentono una riduzione notevole del capitale necessario all'acquisto e di conseguenza del TCO di un veicolo elettrico. L'effetto è visibile maggiormente per auto piccole ed economiche dove il TCO si riduce all'incirca del 46%. Ciò rappresenta un ulteriore beneficio nel caso di acquisto tramite finanziamento, in cui l'importo da finanziare risulta più basso con minore dispendio in termini di rata mensile e di interessi. In conclusione, accedendo ad un incentivo più alto si ha maggiore risparmio economico e si ridimensiona l'ammortamento del veicolo durante il ciclo vita.

CAPITOLO 5: MODELLAZIONE DEGLI SCENARI

L'analisi è proseguita con l'esplorazione di eventuali scenari futuri. Questa parte è molto importante per comprendere la crescita futura delle immatricolazioni dei veicoli elettrici e l'effetto dei fattori economici e sociali. Non è possibile sviluppare solo un ramo, come la vendita delle auto elettriche, senza tenere conto dei vincoli realistici, delle infrastrutture delle normative.

Sono stati formulati tre diversi scenari su R che rappresentano gli sviluppi futuri nei prossimi cinque anni. Si è scelto questo lasso temporale perché, con un periodo più lungo, si hanno dei valori meno accurati dal momento che, l'evoluzione tecnologica e l'economia sono in continuo sviluppo. Gli scenari si differenziano per il numero di vendite di auto elettriche che viene determinato in funzione di parametri modellati su delle grandezze di riferimento.

Dall'analisi condotta da Motus-E [14] si è osservato che le scarse vendite delle auto elettriche, ad oggi, sono imputabili a quattro principali fattori: la ridotta autonomia, i lunghi tempi di ricarica, la mancanza di un'infrastruttura capillare sul territorio e il costo di acquisto elevato di un BEV rispetto ad un ICEV di pari segmento. Tuttavia, si è registrata negli anni un incremento della domanda che mostra un'inversione di tendenza da parte degli italiani che diventano più attenti nei confronti dell'ambiente e di questa tecnologia emergente. A tal proposito, A. Stocchetti mostra nella sua pubblicazione [47] i tratti evolutivi di una transizione necessaria, in particolare *‘il progressivo abbandono dei tradizionali motori a combustione a favore dei propulsori elettrificati’*.

Il costo di acquisto è stato inserito nei modelli con l'introduzione del costo delle batterie in $\$/kWh$. Si stima che il costo della batteria rappresenti all'incirca il 40-50% del prezzo di acquisto di un BEV [48], soprattutto per i veicoli più piccoli ed economici. Quindi, delle variazioni consistenti sul prezzo medio della batteria, possono incidere positivamente o negativamente rispetto al caso base. Un ulteriore parametro preso in considerazione, che influenza il CAPEX, è l'incentivo all'acquisto. L'introduzione degli incentivi ha contribuito all'aumento delle vendite delle auto elettriche negli anni, perché ha aiutato a ridurre la differenza del prezzo di acquisto, rispetto ai veicoli tradizionali.

Dal punto di vista tecnico si è tenuto conto della capacità teorica delle auto di riferimento, e relativa autonomia. Per quanto concerne quest'ultima si è osservato che tale valore è in costante aumento per via dell'incremento dell'efficienza, del miglioramento dello storage e della maggiore capacità del pacco batterie.

Infine, il tempo di ricarica è stato modellato in funzione della numerosità di infrastrutture di ricarica. Grazie alla diffusione di un elevato numero di punti di ricarica ad uso pubblico e dei *fast charge* è possibile ridurre i tempi di ricarica anche sulle lunghe percorrenze.

5.1 Analisi del dataset

Si è partiti da un dataset storico che comprende le vendite di auto elettriche dal 2014 al 2024 [49]. Sono presenti, inoltre, il prezzo delle batterie in $\$/kWh$, il valore degli incentivi nel corso degli anni, l'autonomia media per i veicoli in vendita sul mercato europeo e il numero di punti di ricarica pubblica.

Tabella 23: Elenco delle grandezze di riferimento nel dataset storico [49]

Anno	Vendite	Costo Batterie [$\$/kWh$]	Incentivo [€]	Autonomia [km]	PdR
2014	1.107	500	0	156	1.183
2015	1.452	450	0	215	2.212
2016	1.377	350	0	270	3.314
2017	2.022	300	0	222	5.182
2018	4.999	250	0	217	8.200
2019	10.666	180	4.000	301	13.721
2020	32.500	147	4.000	286	19.324
2021	67.274	136	4.000	309	26.024
2022	49.169	153	4.500	345	36.772
2023	66.265	149	4.500	375	47.228
2024	65.620	111	6.000	400	60.339

Dalla Tabella 23 si osserva che l'incentivo medio è rimasto all'incirca costante negli ultimi anni; per i valori si è fatto riferimento al sito del MASE, mentre il numero di punti di ricarica ad uso pubblico in Italia [13] è aumentato, seguendo un andamento rappresentato nella Figura 40.

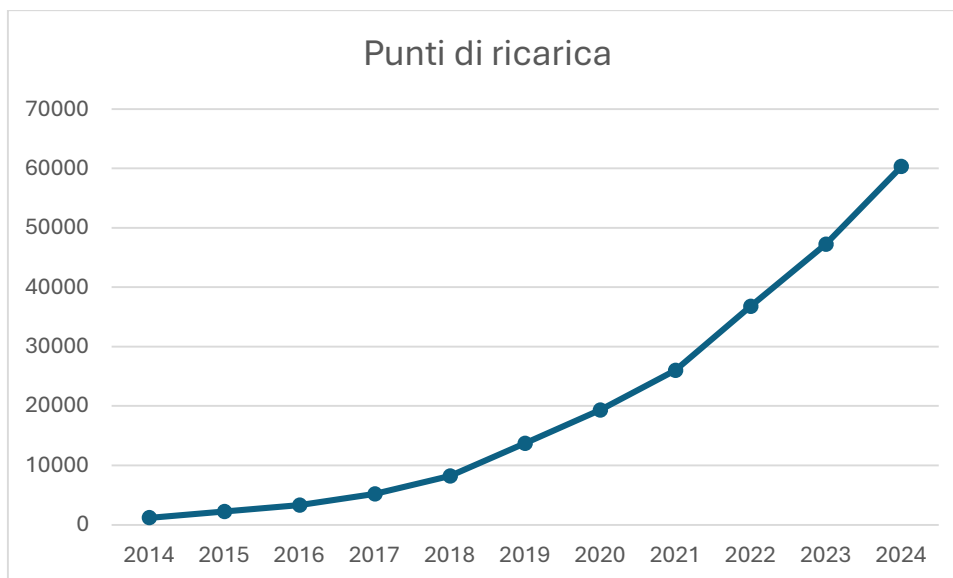


Figura 40: Curva di crescita riferita alla numerosità dei punti di ricarica nel periodo 2014-2024

Il prezzo delle batterie (Figura 41) si è ridotto notevolmente passando da 500 \$/kWh nel 2014 a 111 \$/kWh nel 2024. Ciò è imputabile a una diminuzione del costo delle materie prime e alla riduzione dei costi di produzione. Inoltre, con l'introduzione di nuove tecnologie, più economiche da produrre su larga scala e con una maggiore richiesta, i produttori si sono adoperati per rendere i costi competitivi e migliorare i profitti.

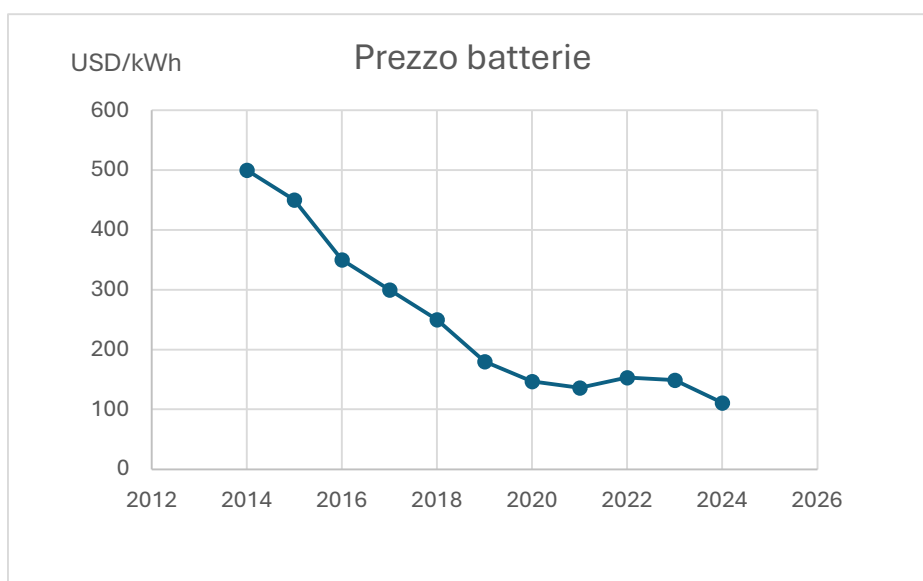


Figura 41: Rappresentazione dell'evoluzione del prezzo delle batterie nel periodo 2014-2024 [50]

Si è voluto analizzare poi il miglioramento tecnologico in termini di autonomia. Per comprendere quanto è incrementata l'autonomia delle auto elettriche a batteria, non essendo presenti dei dati rappresentativi della sola situazione italiana, si è fatto riferimento ai dati forniti dall'Osservatorio Europeo sui combustibili alternativi [43].

Queste statistiche fanno riferimento ai modelli presenti sul mercato negli anni compresi tra il 2011 e il 2024 e sono significative per comprendere il miglioramento generale e la

tendenza di crescita che verificatasi negli ultimi anni. In Figura 42Figura 42 vengono riportati i dati in termini di autonomia media urbana e autonomia media autostradale. Questi valori sono importanti perché permettono di capire il miglioramento in termini assoluti, indicato dalla linea arancione, e il miglioramento per le auto ad utilizzo urbano, più piccole ed economiche, che sono dotate di un pacco batteria di ridotte dimensioni.

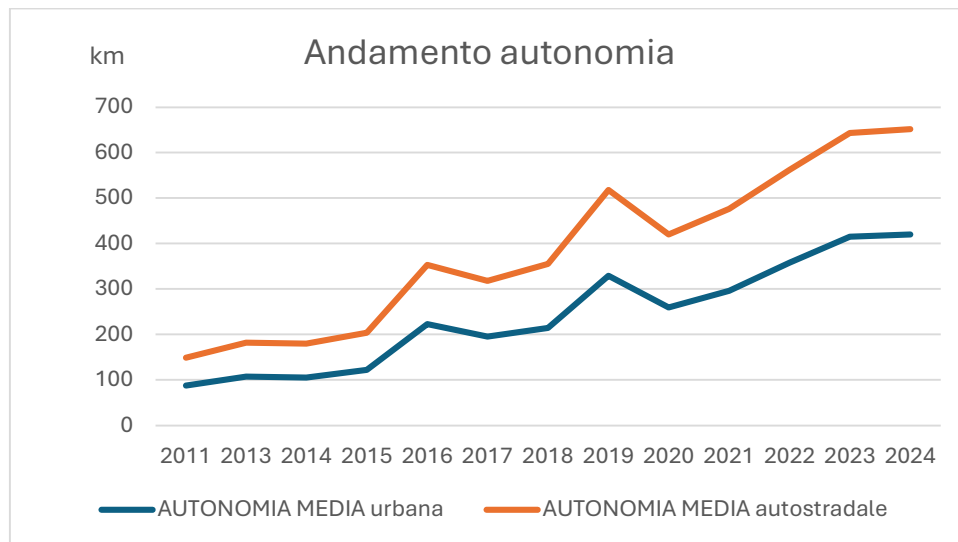


Figura 42: Rappresentazione del miglioramento dell'autonomia media dei BEV in Europa [51]

Negli ultimi sono state introdotte tante vetture sul mercato che offrono un valore di autonomia dichiarata superiore ai 700 km e che contribuiscono ulteriormente ad innalzare il valore medio. Si stima che l'autonomia media dei modelli immessi sul mercato sia compresa tra i 370 e i 440 km. Questo risultato è ben evidenziato in Figura 43, in cui i modelli con autonomia elevata sono raffigurati con il colore arancione e sono stati venduti principalmente dall'anno 2019.

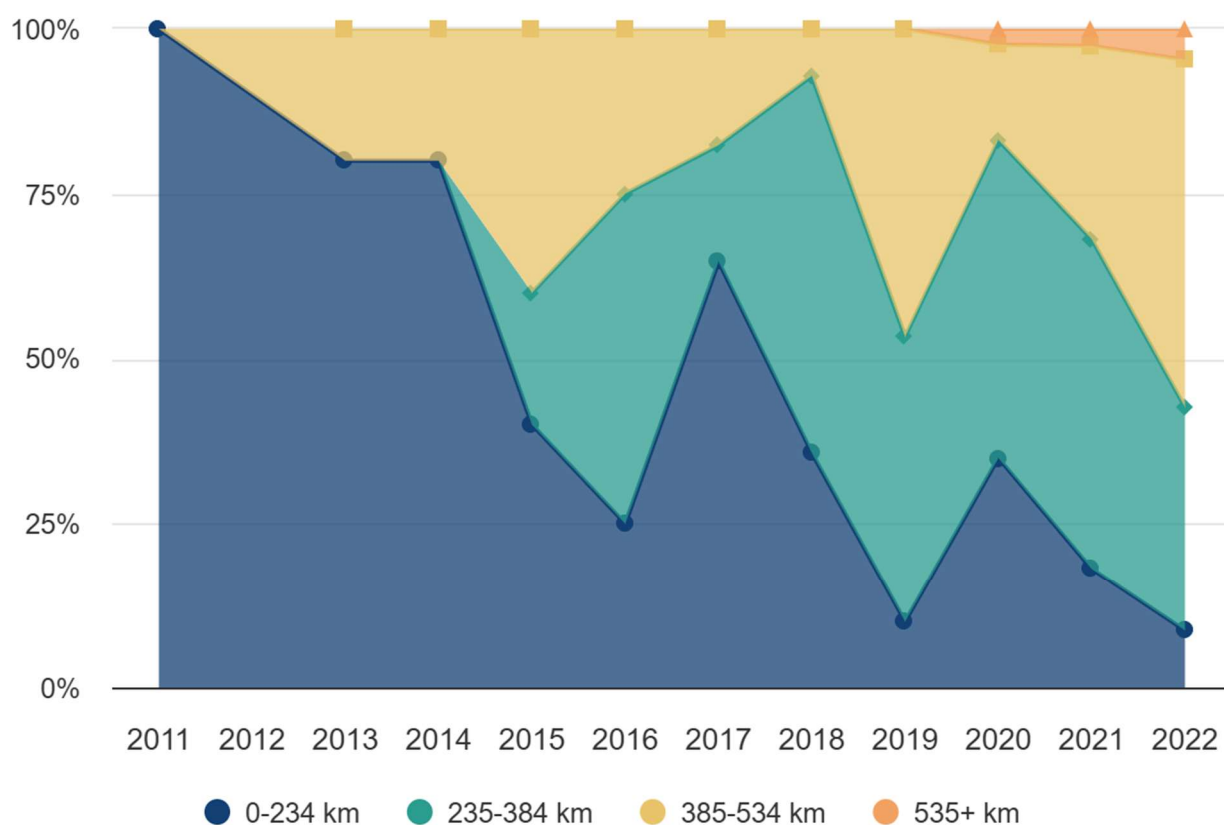


Figura 43: Rappresentazione dei modelli in vendita sul mercato in funzione dell'autonomia [51]

Un altro dato che è interessante da analizzare per valutare l'evoluzione delle performance dei BEV è la capacità media della batteria dei modelli introdotti nell'anno (Tabella 24), per il periodo di riferimento compreso tra il 2011 e il 2023, che è passata da un valore pari a 16,3 kWh nel 2011 a circa 79 kWh per i modelli di punta commercializzati a partire dal 2023. Si tiene conto anche del numero di modelli disponibili sul mercato che è aumentato negli anni, passando dai quattro disponibili nel 2011 agli oltre 371 nel 2023.

Tabella 24: Caratteristiche principali di mercato per i BEV di riferimento nel territorio europeo [51]

ANNO	NUMERO DI MODELLI DISPONIBILI	CAPACITA' MEDIA [kWh]
2011	4	16,3
2012	4	16,3
2013	8	32,9
2014	13	33,3
2015	21	56,4
2016	23	62,4
2017	28	40,4
2018	29	41,2
2019	34	69,5
2020	97	57,8
2021	168	64
2022	253	73,8
2023	371	79,23

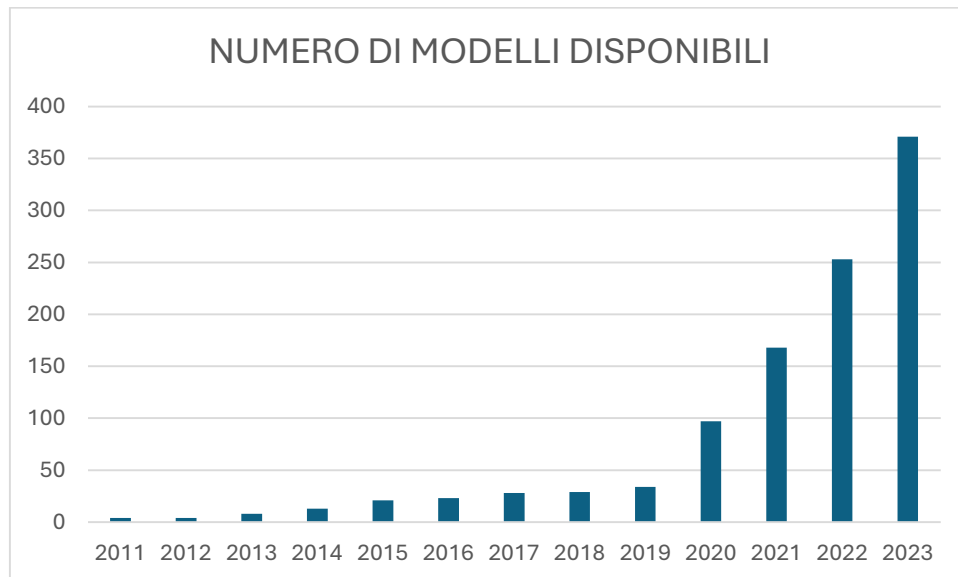


Figura 44: Rappresentazione numero di modelli disponibili sul mercato europeo in funzione dell'anno di riferimento [51]

La crescita del numero di modelli disponibili, rappresentata in Figura 44, è un forte segnale di quanto le case automobilistiche si siano concentrate nello sviluppo dei veicoli elettrici a batteria negli ultimi anni. Questo fenomeno non riguarda solo le case produttrici europee; è una situazione globale che vede come principale produttore la Cina, seguita dai gruppi automobilistici coreani e dal Giappone. Con un numero elevato di modelli sul mercato sono

soddisfatte maggiormente le esigenze dei clienti, non solo dal punto di vista tecnologico, ma anche in termini di dimensioni, prezzo e opportunità di scelta.

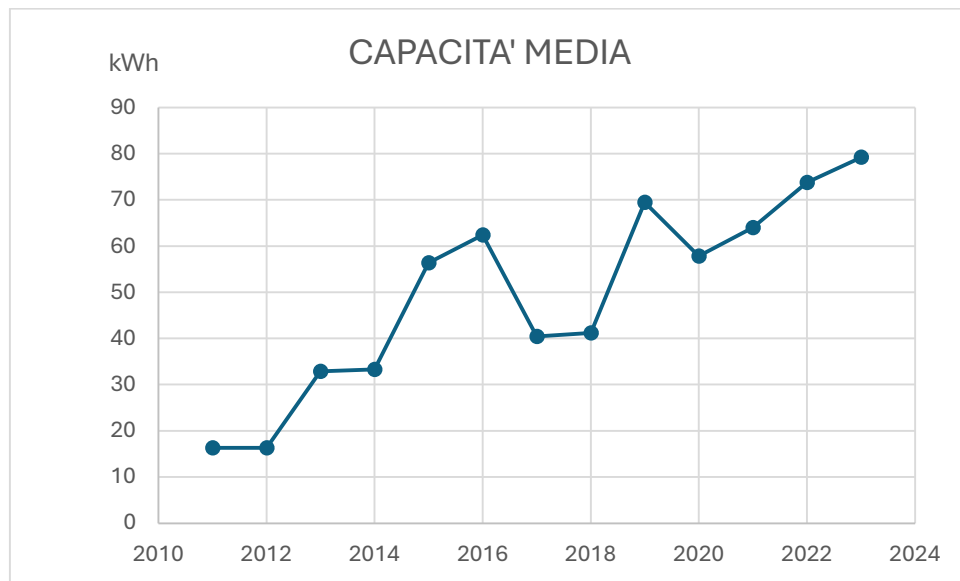


Figura 45: Andamento della capacità media delle batterie

Come conseguenza dell'aumento della capacità media (Figura 45) e di quanto detto finora, negli anni, si osserva un aumento generale delle vendite di BEV, il cui andamento per il mercato italiano è rappresentato in Figura 46. Questo aumento delle immatricolazioni è supportato da una recente pubblicazione su Motus-E che prende come riferimento il mese di giugno 2024 e lo confronta con lo stesso mese dell'anno precedente. [52]

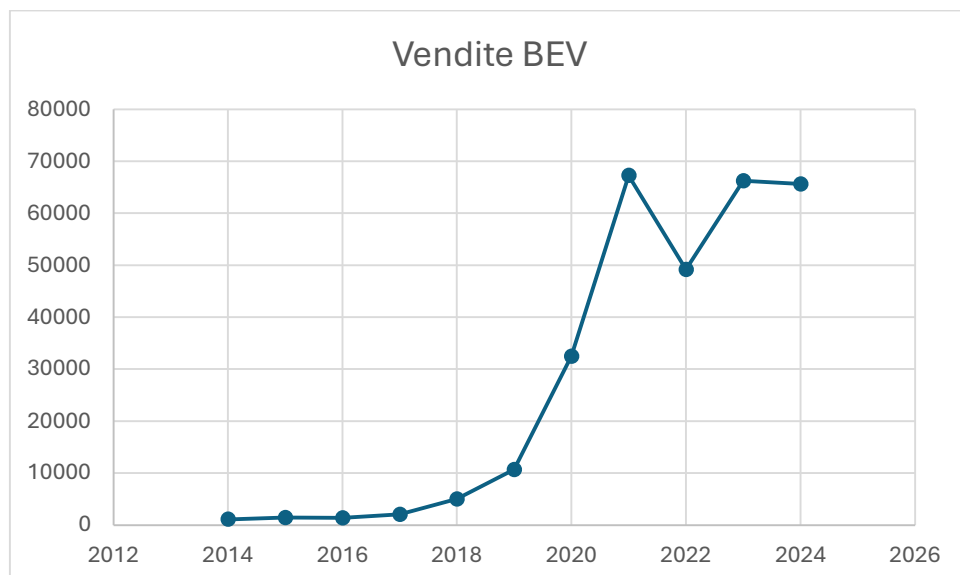


Figura 46: Vendite BEV in Italia (2014-2024)

Questi dati rappresentano la base del modello matematico che è stato costruito per effettuare le previsioni di seguito trattate.

5.2 Scenario pessimistico

Il primo scenario ad essere analizzato è quello pessimistico. In questo modello si vuole rappresentare il crollo della vendita delle auto elettriche e si sono considerati come principali parametri di riferimento il prezzo delle batterie e gli incentivi. Si sono formulate delle ipotesi che vedono la variazione di questi parametri tenendo conto dell'aumento del prezzo delle batterie, dovuto a fattori come la difficoltà nell'estrazione della materia prima, o l'aumento della domanda che supera la capacità di produzione. Un altro eventuale motivo di alterazione del prezzo può essere l'avvenire di un conflitto o l'inasprimento di tensioni tra i Paesi produttori e i Paesi che importano le batterie. Ciò si traduce in un innalzamento del prezzo di acquisto dei BEV, che diventano meno convenienti degli ICEV corrispondenti. Ad aggravare questo divario si aggiunge la diminuzione degli incentivi da parte del governo che fa aumentare ulteriormente il CAPEX.

Nel caso specifico si è deciso di considerare un raddoppio del prezzo delle batterie, all'anno 2029 e una riduzione degli incentivi medi, fino all'azzeramento previsto per l'anno 2029 (Tabella 25).

Tabella 25: Ipotesi della variazione delle variabili indipendenti per lo Scenario Pessimistico

ANNO	COSTO BATTERIE [\$ kWh]	INCENTIVO [€]
2025	149	3.000
2026	155	2.500
2027	176	2.000
2028	188	1.000
2029	222	0

Il modello impiegato nel calcolo è una regressione non lineare che utilizza splines naturali per modellare le vendite in funzione del prezzo delle batterie e dell'incentivo. Si è scelto di adottare le splines naturali per avere un buon compromesso tra la significatività e l'accuratezza del modello. Le splines suddividono i dati in diversi intervalli e permettono di ottenere adattabilità e stabilità. Si sono utilizzati due gradi di libertà per le variabili indipendenti, poiché sono le variabili che influenzano in maniera significativa il numero di vendite. Aumentando il numero di gradi di libertà del costo della batteria il modello infatti diventa più accurato ma meno significativo statisticamente e più soggetto all'overfitting. Per l'Incentivo invece il valore massimo di gradi di libertà da settare è pari a 2. La formulazione matematica del modello è la seguente:

$$Vendite = \beta_0 + \beta_1 * f(Costo\ batterie) + \beta_2 * f(Incentivo) + \epsilon \quad (14)$$

Dove:

- *Vendite* è il numero di immatricolazioni previsto;
- β_0 è l'intercetta del modello;
- β_1 e β_2 sono i coefficienti del modello;
- f è una funzione splines naturale applicata alle variabili indipendenti;
- ϵ è il residuo e rappresenta la variabilità delle vendite non spiegata dal modello;

I parametri del modello, descritto dall'equazione (14) e le metriche di valutazione vengono riportati in Appendice B.

Di seguito, in Figura 47, si ha una rappresentazione dello Scenario Pessimistico.

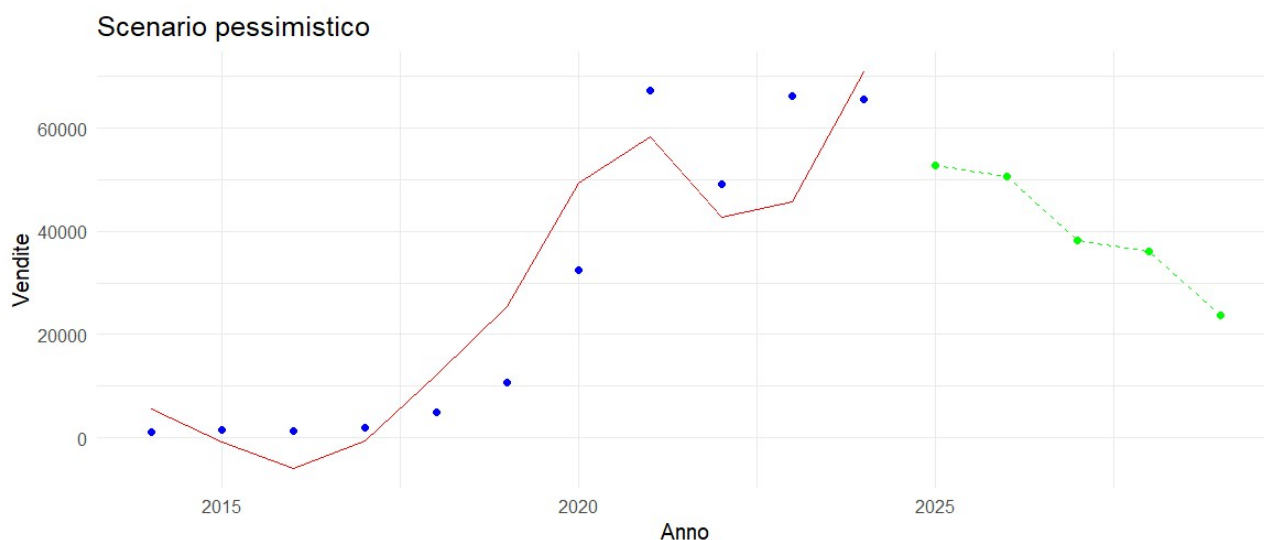


Figura 47: Rappresentazione del modello impiegato nell'analisi dello scenario pessimistico

La funzione in rosso rappresenta il modello basato sull'andamento delle vendite nel periodo compreso fra il 2014 e il 2024. In verde è indicato il numero di immatricolazioni previste negli anni futuri 2025-2029.

Tabella 26: Elenco delle immatricolazioni previste dal modello impiegato nello Scenario Pessimistico

ANNO	IMMATRICOLAZIONI PREVISTE
2025	52.681
2026	50.682
2027	38.224
2028	36.172
2029	23.686

Si osserva, dalla Tabella 26Tabella 27, una diminuzione delle immatricolazioni di veicoli elettrici a batteria che all'anno 2029 vede una riduzione pari a 1/3 del totale del valore registrato per l'anno 2024.

Si vuole ora effettuare una stima della variazione del TCO per le auto elettriche in questo scenario.

Oltre all'aumento del CAPEX in base alle ipotesi fatte precedentemente, in uno scenario di crisi energetica si può ipotizzare l'aumento delle tariffe di ricarica che contribuisce all'incremento dell'OPEX e quindi del TCO. Con una variazione del 20% in più dei costi variabili dovuti all'energia elettrica si ha il seguente scenario al 2029, che congiuntamente alla variazione del costo della batteria produce i risultati visibili in Tabella 27.

Tabella 27: Variazione dei principali costi nello Scenario Pessimistico in funzione delle ipotesi precedenti

Marca	Modello	Capacità batteria [kWh]	Costo batteria [€]		Costo energia [€]	
			2024	2029	2024	2029
DACIA	Spring	26,8	2.974,8	5.652,12	5.359,98	6.431,98
PEUGEOT	E-208	50	5.550	10.545	6.253,31	7.503,97
VOLKSWAGEN	ID.3	58	6.438	12.232,2	6.172,10	7.406,52
TESLA	Model 3	53	5.883	11.177,7	5.359,98	6.431,98
BMW	Serie 5	83,9	9.312,9	17.694,51	6.456,34	7.747,61

Tabella 28: Variazione del TCO nello Scenario Pessimistico rispetto al caso base

Marca	Modello	TCO [€]	
		2024	2029
DACIA	Spring	24.034,22	33.783,54
PEUGEOT	E-208	42.503,42	54.749,08
VOLKSWAGEN	ID.3	44.243,05	57.271,67
TESLA	Model 3	52.577,21	58.943,91
BMW	Serie 5	79.616,79	89.289,67

Dalla Tabella 28 si osserva un aumento generale del costo totale di proprietà. Questo incremento è più grande per i veicoli che hanno un pacco batterie di capacità elevata e quelli che usufruiscono di incentivi nello scenario base. In Figura 48 è rappresentato in Blu il TCO per i veicoli in esame all'anno 2024, mentre in Arancione, il valore previsto all'anno 2029.

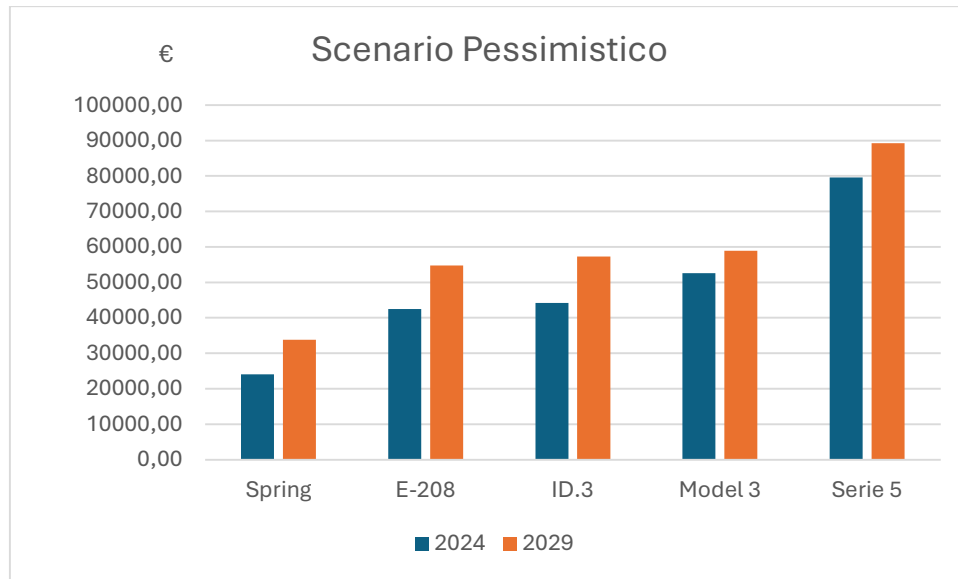


Figura 48: Rappresentazione nel diagramma a barre del TCO - Caso base (2024) vs Scenario Pessimistico (2029)

In questo scenario è sconveniente l'acquisto di un BEV e come conseguenza si ha il rallentamento dello sviluppo delle infrastrutture di ricarica. È lo scenario meno interessante da analizzare dal punto di vista energetico e non sono necessarie considerazioni sulla produzione dell'energia e sull'integrazione dei veicoli elettrici con la rete.

Si è calcolato il CAGR che è il tasso annuo di crescita composto. Questo valore è molto importante poiché rappresenta la crescita percentuale media di una grandezza in un lasso di tempo. La sua espressione è la seguente:

$$CAGR = \left(\frac{X_n}{X_o} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (15)$$

Dove:

- X_n rappresenta il valore delle vendite nell'anno 2029;
- X_o rappresenta il valore delle vendite nell'anno 2024;
- n è il numero di anni.

Nel caso specifico, esplicitando i parametri dell'equazione (15) si ottiene:

$$CAGR = \left(\frac{23.686}{65.620} \right)^{\frac{1}{5}} - 1 = -18,44 \% \quad (16)$$

Dall'equazione (16) si ottiene un valore negativo, prevedibile, dal momento che si verifica il crollo delle vendite dei BEV. La transizione energetica non avviene secondo i termini prefissati dal pacchetto *Fit for 55* entro il 2030 e non si ha il raggiungimento degli obiettivi previsti, sia dal punto di vista ambientale che energetico.

5.3 Scenario conservativo

Il secondo modello formulato invece riguarda uno scenario conservativo. In questo modello, denominato anche *Business As Usual*, si ipotizza che non ci siano cambiamenti significativi. Le leggi e le tariffe di ricarica seguono il loro sviluppo ordinario, per questo viene anche definito ‘scenario come al solito’, e i tassi di crescita sia dei prezzi che delle performance tecniche registrano un andamento coerente con quello degli ultimi anni. Non sono quindi presenti imprevisti, crisi energetiche, innalzamenti repentini dei prezzi o particolari provvedimenti legislativi che alterano il mercato e lo sviluppo tecnologico.

In questo scenario si ipotizza una diminuzione del costo delle batterie rappresentata in Figura 49, come da previsioni di Goldman Sachs [50]. Di conseguenza si ha la diminuzione del costo di acquisto di un BEV.

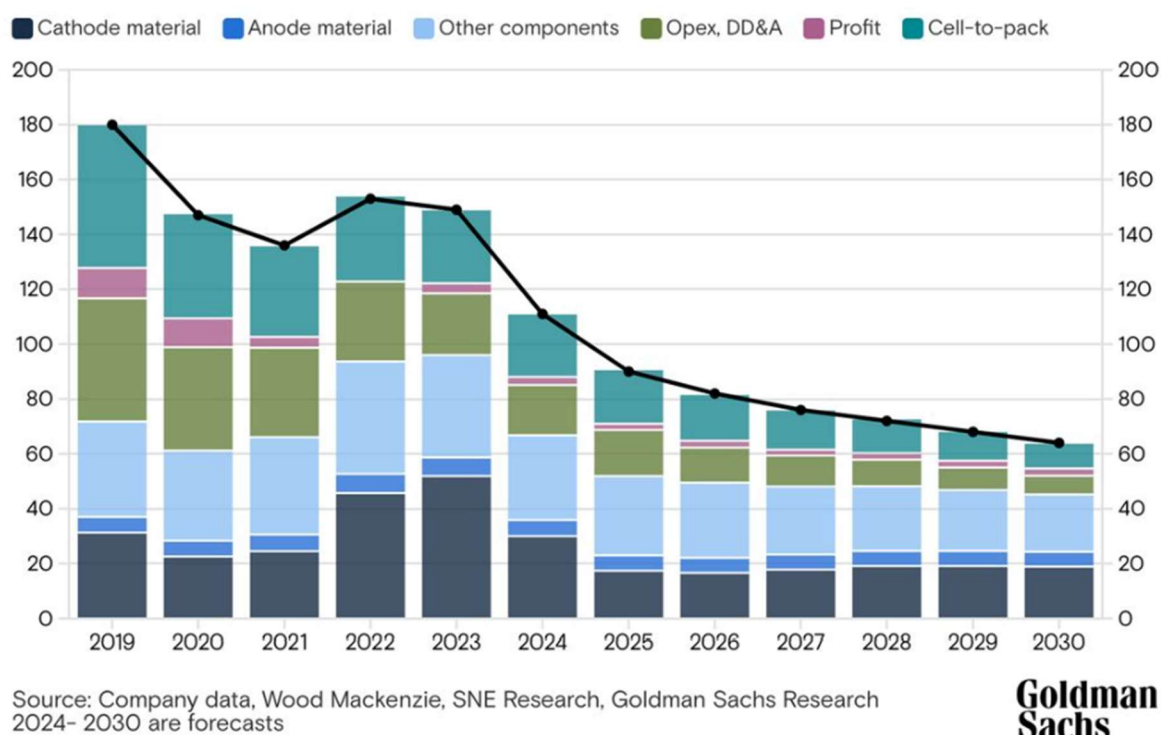


Figura 49: Rappresentazione del costo delle batterie (2019-2030) [50]

Si considera, inoltre, che l’incentivo rimanga costante e che il numero di punti di ricarica cresca secondo la tendenza registrata negli ultimi anni. Per ottenere il numero di punti di ricarica ad uso pubblico nei cinque anni dell’analisi si è utilizzata una regressione polinomiale di secondo grado, che sulla base dei valori registrati dal 2014 al 2024, consente di ottenere una curva di previsione e i dati per ciascun anno di riferimento. È stato scelto questo approccio perché rappresenta bene la crescita delle infrastrutture di ricarica, assumendo che la crescita del futuro sia simile a quella del passato. L’andamento è rappresentato in Figura 50.

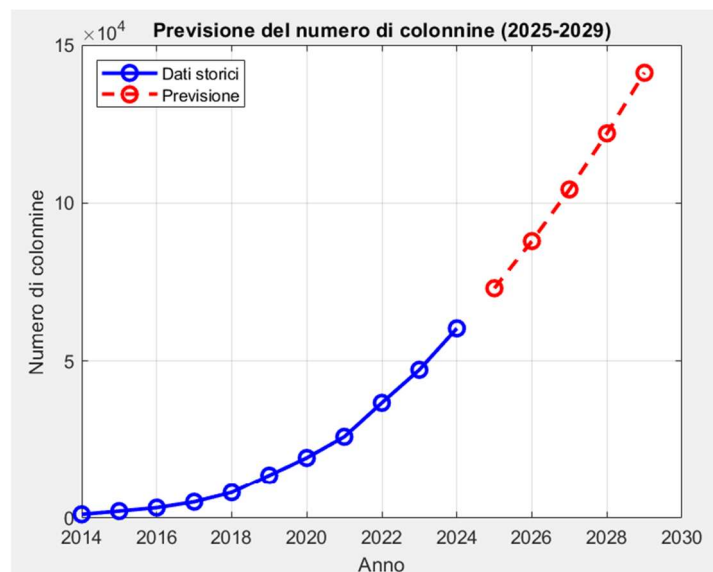


Figura 50: Calcolo del numero di punti di ricarica negli anni futuri dello scenario BAU secondo regressione

In blu sono rappresentati i dati storici, presenti nel database, mentre in rosso sono rappresentate le previsioni. I parametri del modello sono riportati in Appendice C.

In questo scenario si tiene conto anche dell'aumento dell'autonomia media di un veicolo elettrico che segue la tendenza di crescita registrata negli ultimi anni e riportato in Figura 51. Per ottenere il valore dell'autonomia negli anni futuri si è applicata una regressione lineare di ordine 1, i cui parametri sono riportati in Appendice C.

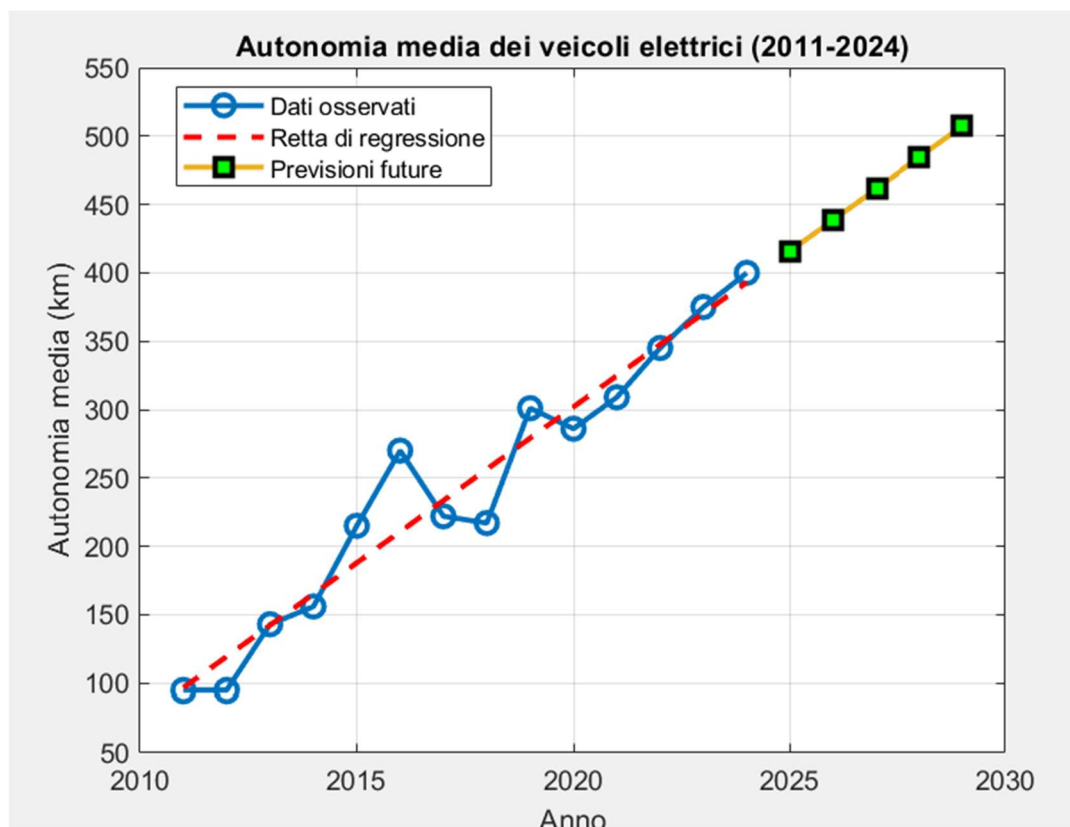


Figura 51: Calcolo dell'autonomia negli anni dello scenario conservativo secondo regressione

Si osserva che la crescita dell'autonomia negli anni può essere rappresentata in prima approssimazione da una retta di regressione raffigurata con il colore rosso. Le previsioni sono di colore verde per evidenziare la differenza dai valori reali presenti nel dataset storico, rappresentati in blu. I dati ottenuti sono riportati nella Tabella 29.

Tabella 29: Previsioni delle variabili indipendenti nello scenario conservativo per il periodo 2025-2029

ANNO	PREVISIONI		
	PUNTI DI RICARICA	AUTONOMIA [km]	COSTO BATTERIE [\$/kWh]
2025	73.029	416	90
2026	87.948	439	82
2027	104.282	462	76
2028	122.031	484	72
2029	141.197	507	68

Al 2029 si stima un numero di punti di ricarica pari a 141.197 e un valore di autonomia media pari a 507 km per ciascun veicolo, quindi migliore del dato attuale e più vicino ai 700 km circa di un veicolo a benzina.

Si è costruito un modello previsionale basato su una regressione lineare multipla che prevede il numero di auto elettriche immatricolate negli anni, in funzione delle variabili indipendenti quali numero di punti di ricarica, costo delle batterie e autonomia media dei veicoli elettrici. La formulazione matematica del modello è la seguente:

$$Vendite = \beta_0 + \beta_1 * (Colonnine) + \beta_2 * (Costo Batterie) + \beta_3 * (Autonomia) + \epsilon \quad (17)$$

Dove:

- *Vendite* è il numero di immatricolazioni previsto;
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ sono i coefficienti della regressione. Rappresentano il peso di ciascuna variabile indipendente sulla variabile dipendente e sono stimati dal modello.
- ϵ è il residuo.

In Appendice C viene riportato il valore dei coefficienti dell'equazione (17) stimati dal modello e le metriche di valutazione.

Lo Scenario Conservativo è rappresentato in Figura 52.

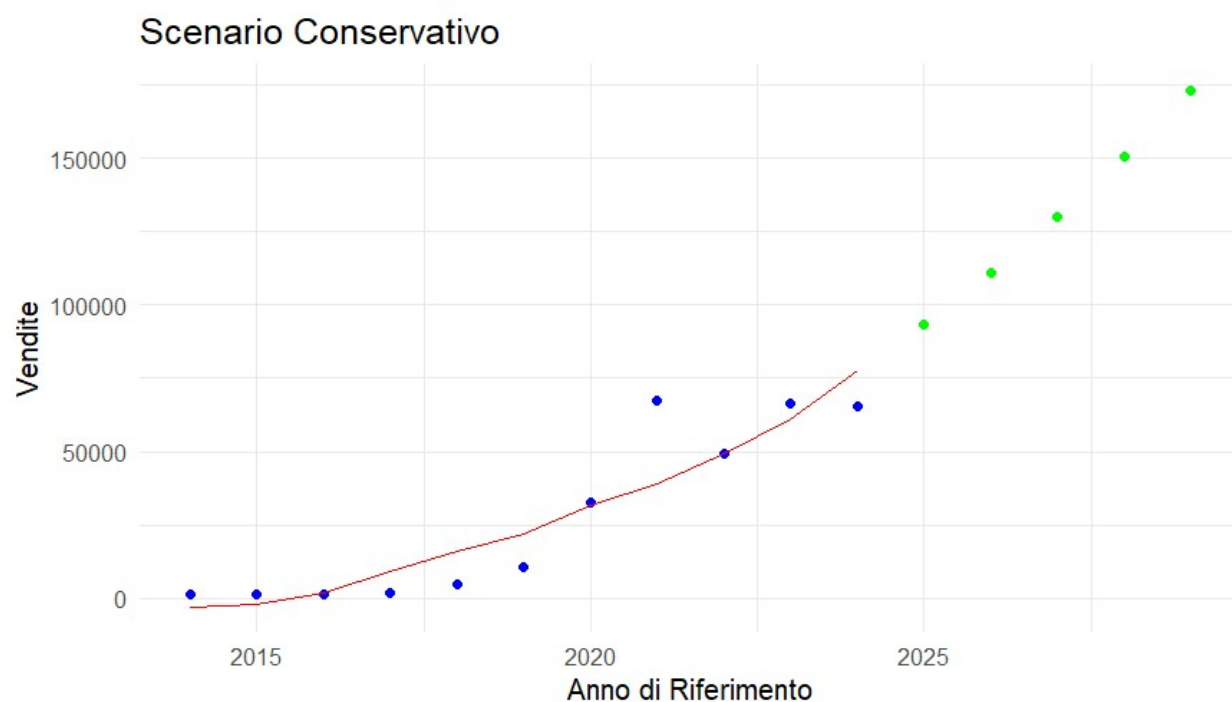


Figura 52: Rappresentazione del modello impiegato per l'analisi dello scenario conservativo

In rosso è indicata la funzione che rappresenta l'andamento delle immatricolazioni negli anni 2014-2024. In verde sono indicate le immatricolazioni previste dal 2025 al 2029. L'andamento è coerente con quello che ci si aspetta da uno scenario conservativo.

Tabella 30: Immatricolazioni previste secondo lo scenario conservativo per il periodo 2025-2029

ANNO	IMMATRICOLAZIONI PREVISTE
2025	93.426
2026	110.875
2027	129.942
2028	150.679
2029	173.094

Nella Tabella 30 sono riportati i valori relativi allo scenario in cui si ha lo sviluppo delle auto elettriche, che affiancano i veicoli tradizionali all'interno del parco veicolare italiano. Si evince, quindi un aumento delle immatricolazioni dei veicoli elettrici che è supportato da alcune recenti pubblicazioni da parte di riviste del settore [53].

Si calcola il CAGR, equazione (15), che nel caso specifico vale:

$$CAGR = \left(\frac{173.094}{65.620} \right)^{\frac{1}{5}} - 1 = 21,41 \% \quad (18)$$

Il valore ottenuto dall'equazione (18) dimostra un incremento delle auto elettriche negli anni, che però non è sufficiente al raggiungimento degli obiettivi previsti dal pacchetto *Fit for 55*. Tale ipotesi è supportata da un'analisi economica riportata sul quotidiano 'la Repubblica' del 3 ottobre 2024 [54].

Si vuole valutare la variazione del costo totale di proprietà in questo scenario. Il TCO delle auto elettriche diminuisce leggermente rispetto al caso base a causa della sola riduzione del prezzo delle batterie, mentre rimangono costanti le altre condizioni al contorno, in particolare gli OPEX e i costi Extra.

Tabella 31: Calcolo della variazione dei principali costi nello scenario conservativo

Marca	Modello	Capacità batteria [kWh]	Costo batteria [€]	
			2024	2029
DACIA	Spring	26,8	2.974,8	1.731,28
PEUGEOT	E-208	50	5.550	3.230
VOLKSWAGEN	ID.3	58	6.438	3.746,8
TESLA	Model 3	53	5.883	3.423,8
BMW	Serie 5	83,9	9.312,9	5.419,94

Dalla Tabella 31 si vede una riduzione generale del costo delle batterie, che è funzione della capacità totale della batteria stessa. Questo ha un effetto positivo sul prezzo di vendita e quindi sul CAPEX che diminuisce da un minimo di circa 1.200 € per la Dacia Spring, la vettura con batteria di capacità inferiore, ad un massimo di quasi 4.000 €, per la BMW Serie 5 che presenta la batteria di dimensioni maggiori rispetto alle auto del confronto.

Tabella 32: Calcolo della variazione del TCO nello scenario conservativo

Marca	Modello	TCO [€]	
		2024	2029
DACIA	Spring	24.034,22	22.790,7
PEUGEOT	E-208	42.503,42	40.183,42
VOLKSWAGEN	ID.3	44.243,05	41.551,85
TESLA	Model 3	52.577,21	50.118,01
BMW	Serie 5	79.616,79	75.723,83

In Tabella 32 è indicato i valori del TCO per ciascun veicolo. Nel diagramma a barre in Figura 53 è raffigurato il TCO calcolato con le ipotesi dell'anno corrente (2024) in blu e in

arancione con le ipotesi dell'anno 2029. Si osserva una riduzione generale del TCO per i veicoli BEV in esame.

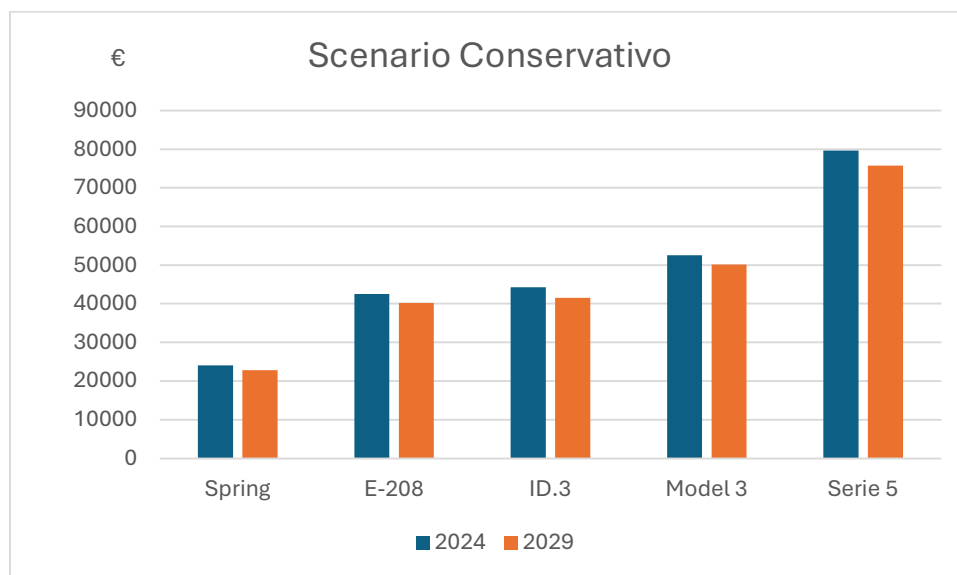


Figura 53: Rappresentazione nel diagramma a barre del TCO - Caso Base (2024) vs Scenario Conservativo (2029)

In questo scenario non si riesce a raggiungere il target previsto di BEV al 2030. È uno scenario in cui la crescita è troppo lenta e non si raggiungono gli obiettivi previsti dal pacchetto *Fit for 55*. La riduzione delle emissioni nel settore trasporti dovute alle auto passeggeri è comunque superiore se confrontata con lo scenario pessimistico, grazie al maggiore numero di BEV nel parco auto italiano.

5.4 Scenario ottimistico

Il terzo modello descrive uno scenario ottimistico. Si tratta di uno scenario *Policy Driven* in cui vengono introdotte nuove politiche a favore della vendita di BEV.

In questo modello si considera l'introduzione di un nuovo incentivo da parte del governo per favorire la vendita di auto elettriche che consiste in un importo pari a 1.500 €, una tantum, all'acquisto diretto del veicolo in concessionaria. Tale importo viene emanato senza vincoli sul prezzo di acquisto e sul reddito dell'acquirente e va a compensare le spese di immatricolazione del veicolo e le spese di registrazione. Il prezzo di acquisto diminuisce ulteriormente a causa della diminuzione del prezzo medio delle batterie, che segue la tendenza prevista da Goldman e Sachs [50]. Per favorire la diffusione dei veicoli elettrici a batteria, vengono introdotti ulteriori incentivi indiretti, sulla base del modello norvegese. In particolare, si è ipotizzato di adottare i seguenti provvedimenti:

- Una riduzione del 50% delle tariffe autostradali per i possessori di BEV;

- Una riduzione del 100% delle tariffe orarie dovute al parcheggio nelle città. In questo modo, soprattutto nei centri urbani, la diffusione dei BEV, contrasta l'inquinamento locale e aiuta a mantenere sotto controllo le emissioni di CO2 e di particolato.
- L'accesso alle ZTL, a vita, per tutte le città italiane per i veicoli elettrici e l'utilizzo di corsie preferenziali riservate al TPL. Ciò consente una riduzione dei tempi di spostamento e un accesso a maggiori servizi.;
- Una riduzione del 50% dei costi relativi al trasporto marittimo dei veicoli elettrici. Questo provvedimento serve a incentivare soprattutto i proprietari di BEV residenti nelle isole, che sono costretti ad usare i traghetti per spostarsi al di fuori dalla regione di residenza;
- Un aumento della tassazione per i veicoli dotati di motore a combustione che è maggiore per i veicoli più inquinanti, in funzione delle emissioni dichiarate dalla casa costruttrice, ma anche della tipologia di carburante impiegato e della potenza dichiarata.

Questo scenario tiene conto di uno sviluppo tecnologico ed economico molto rapido, a differenza dello scenario BAU che si basava sulla tendenza di crescita degli anni precedenti e sull'innovazione spontanea delle principali case produttrici. Si ipotizza quindi, in questo approccio ottimistico, l'ampliamento dell'offerta da parte dei gruppi produttori di auto che, dismettono gradualmente la produzione di veicoli endotermici per concentrare lo sviluppo e la produzione di BEV e PHEV. Come conseguenza di ciò, si ha un miglioramento delle performance tecniche che si traduce in un aumento del valore medio dell'autonomia, superiore ai 507 km previsti nello scenario conservativo, un aumento della capacità media delle batterie e una riduzione dei tempi di ricarica.

L'infrastruttura di ricarica, in questo scenario, si sviluppa più velocemente per soddisfare le esigenze degli acquirenti, e in maniera capillare sul territorio, andando ad abbassare ulteriormente i tempi di ricarica medi e risultando più accessibile all'utenza. In questo modo l'infrastruttura diventa usufruibile anche da parte di chi non dispone di uno spazio privato per la ricarica, dai turisti e da coloro che offrono servizi.

Per ottenere questi risultati si è deciso di adottare un andamento delle vendite di tipo esponenziale. Questo perché un modello esponenziale spiega bene la diffusione di un'innovazione, ovvero delle auto BEV come tecnologia veicolare alternativa. Inoltre, matematicamente spiega adeguatamente una crescita rapida delle immatricolazioni negli ultimi anni. Con questo modello si è considerato quindi che i bassi valori di vendita dei BEV

nei primi anni siano giustificati dal fatto che la tecnologia è innovativa e non accessibile a tutti per vari motivi. Negli anni, però, la tecnologia diventa più matura e le altre persone, influenzate dai miglioramenti tecnologici sopra descritti, dai benefici economici e da una maggiore consapevolezza ambientale, decidono di imitare. Quindi cambiando i fattori economici, sociali e culturali, si ha un incremento delle vendite di BEV. Si è impostato il target da raggiungere al 2030, che secondo il PNIEC è pari a 4,3 milioni di auto elettriche circolanti all'interno del parco macchine italiano e ignorando lo storico delle vendite dal 2014 al 2024.

Il modello ha quindi calcolato le previsioni fino all'anno 2030 e le ha corrette in funzione del target grazie all'introduzione di un fattore di scala. La formulazione matematica alla base del modello è la seguente:

$$Vendite = e^{\beta_0 + \beta_1 * Anno} \quad (19)$$

Dove:

- *Vendite* è il valore target che si vuole raggiungere al 2030;
- β_0 è l'intercetta;
- β_1 è un coefficiente che rappresenta la pendenza e indica se le vendite nel corso del tempo stanno aumentando o diminuendo.

I parametri riportati nell'equazione (19), e le metriche di valutazione del modello sono riportati in Appendice D.

Il grafico in Figura 54 descrive l'andamento delle vendite negli anni futuri.

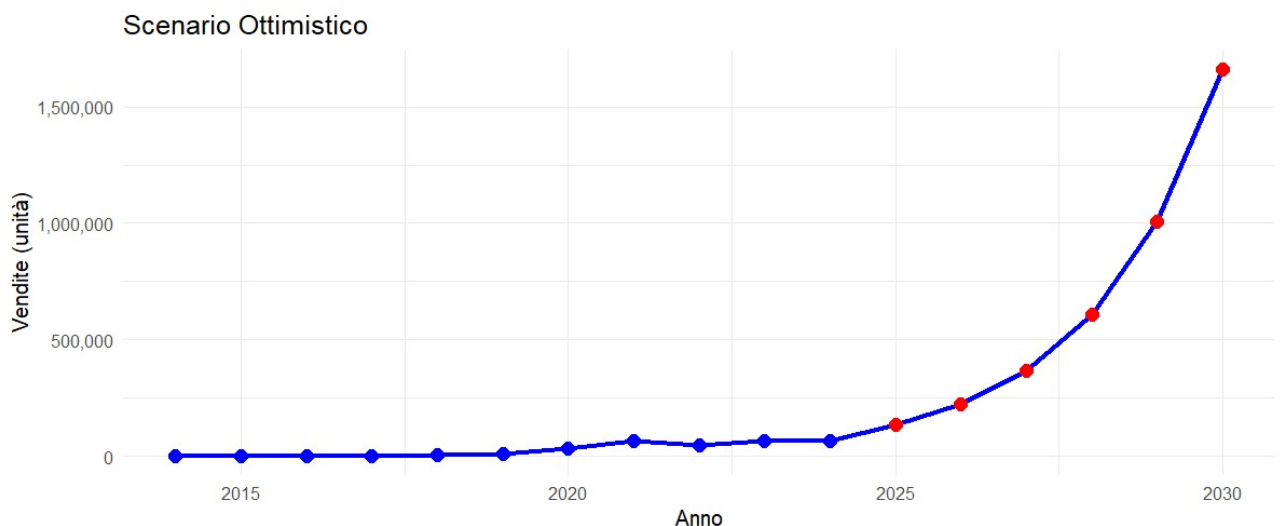


Figura 54: Rappresentazione del modello impiegato nell'analisi dello scenario ottimistico

I punti in blu sono i valori delle vendite di BEV nel periodo compreso tra il 2014 e il 2024. In rosso invece sono indicate le previsioni del modello, dall'anno 2025 al 2030. Si osserva un andamento crescente, con dei valori elevati soprattutto per gli anni 2029 e 2030. Ciò è

imputabile al fatto che l'Italia per raggiungere il target previsto deve aumentare notevolmente le vendite annuali. In Tabella 33 sono riportate le previsioni fino al 2030.

Tabella 33: Calcolo delle immatricolazioni previste dal modello nello scenario ottimistico

ANNO	IMMATRICOLAZIONI PREVISTE
2025	134.479
2026	222.327
2027	367.560
2028	607.668
2029	1.004.624
2030	1.660.891

Successivamente, si è calcolato il CAGR, usando l'equazione (15), per l'anno 2029.

$$CAGR = \left(\frac{1.004.624}{65.620} \right)^{\frac{1}{5}} - 1 = 72,58 \% \quad (20)$$

Il valore ottenuto nell'equazione (20) è molto alto rispetto a quello ottenuto per lo scenario conservativo, infatti simboleggia un incremento annuo, in media superiore al 70%. Ciò è prevedibile dal momento che l'Italia al 2024, è indietro nella transizione energetica nel settore dei trasporti rispetto ad altri stati europei [22]; pertanto, l'unico modo per raggiungere il target previsto è imponendo una crescita maggiore di quella prevista nello scenario conservativo. A supporto di quanto affermato finora, si sono analizzate due pubblicazioni. La prima fa riferimento all'impiego di un modello esponenziale per ottenere i valori target all'anno 2030 [55]. Il secondo articolo fa riferimento alle sfide e ai progressi del processo di elettrificazione sul suolo nazionale italiano al 2030 [56].

Si valuta adesso la variazione dei singoli contributi e gli effetti che tali variazioni hanno sul TCO in questo scenario. La prima variazione calcolata (Tabella 34) è relativa al costo del pacco batterie, che diminuisce, e all'introduzione dell'incentivo all'acquisto che non è presente nel caso base. Ciò comporta una diminuzione generale del CAPEX.

Tabella 34: Calcolo della variazione dei singoli contributi sul CAPEX nello scenario ottimistico

Marca	Modello	Capacità batteria [kWh]	Costo batteria [€]		Incentivo ulteriore per tutti i BEV [€]	
			2024	2029	2024	2029
DACIA	Spring	26,8	2.974,8	1.731,28	0	1.500
PEUGEOT	E-208	50	5.550	3.230	0	1.500
VOLKSWAGEN	ID.3	58	6.438	3.746,8	0	1.500
TESLA	Model 3	53	5.883	3.423,8	0	1.500
BMW	Serie 5	83,9	9.312,9	5.419,94	0	1.500

La seconda variazione del TCO (Tabella 35) è dovuta alla diminuzione simultanea dei costi per la ricarica del veicolo e dei costi extra, relativi al pedaggio autostradale e alle tariffe del parcheggio. Questa ha effetti positivi sui costi operazionali.

Tabella 35: Calcolo della variazione degli OPEX nello scenario ottimistico

Marca	Modello	costo energia [€]		costi extra [€]	
		2024	2029	2024	2029
DACIA	Spring	5.359,98	4.287,98	4.316,633	624,34
PEUGEOT	E-208	6.253,31	5.002,65	4.316,633	624,34
VOLKSWAGEN	ID.3	6.172,10	4.937,68	4.316,633	624,34
TESLA	Model 3	5.359,98	4.287,98	4.316,633	624,34
BMW	Serie 5	6.456,34	5.165,07	4.316,633	624,34

Globalmente si osserva una riduzione simultanea del CAPEX e dell'OPEX, che ha effetti positivi sul TCO, come indicato in Tabella 36.

Tabella 36: Calcolo della variazione del TCO nello scenario ottimistico

Marca	Modello	TCO [€]	
		2024	2029
DACIA	Spring	24.034,22	16.526,41
PEUGEOT	E-208	42.503,42	33.740,46
VOLKSWAGEN	ID.3	44.243,05	35.125,14
TESLA	Model 3	52.577,21	43.853,72
BMW	Serie 5	79.616,79	69.240,27

Tale valore diminuisce da un minimo di 7.507,81 € della Dacia Spring a un massimo di 10.376,52 € della BMW Serie 5. In questo scenario l'acquisto di un BEV risulta essere sempre la scelta più vantaggiosa in termini economici rispetto ad un ICEV. Se si considera, inoltre, l'introduzione di una tassa sull'inquinamento per i veicoli che producono inquinanti, il divario aumenta ulteriormente.

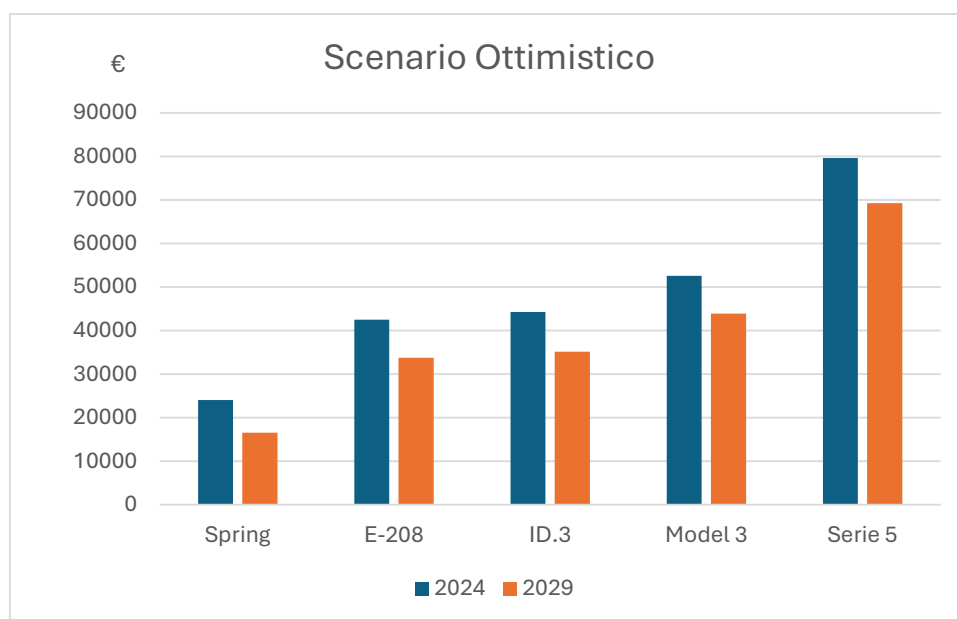


Figura 55: Rappresentazione nel diagramma a barre del TCO - Caso Base (2024) vs Scenario Ottimistico (2029)

Nel diagramma a barre in Figura 55 è rappresentato il valore del TCO per i 5 modelli di riferimento. In blu è rappresentato il caso base all'anno 2024, mentre in arancione il valore previsto al 2029.

Con la formulazione di questo modello gli obiettivi al 2030, nel settore dei trasporti per gli autoveicoli destinati al trasporto passeggeri, sono raggiunti. Pertanto, va analizzata l'integrazione delle auto con la rete, con la produzione di energia e gli effetti in termini di emissioni.

5.5 Confronto fra scenari

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti dai modelli precedenti in forma grafica e tabellare. In Tabella 37 sono inseriti i valori di riferimento per le immatricolazioni previste, partendo dall'anno 2024 all'anno 2029.

Tabella 37: Confronto delle nuove immatricolazioni ottenute dai modelli nei vari scenari (2024-2029)

IMMATRICOLAZIONI PREVISTE			
ANNO	PESSIMISTICO	BAU	PD
2024	65.620	65.620	65.620
2025	52.681	93.426	134.479
2026	50.682	110.875	222.327
2027	38.224	129.942	367.560
2028	36.172	150.679	607.668
2029	23.686	173.094	1.004.624

In Tabella 38 è presente invece il valore totale al 2029 di nuove immatricolazioni previste per i BEV.

Tabella 38: Confronto delle immatricolazioni totali previste dai vari modelli nei diversi scenari all'anno 2029

NUOVE IMMATRICOLAZIONI PREVISTE			
	PESSIMISTICO	BAU	PD
TOTALE	201.445	658.016	2.336.658

Si osserva al 2029, una situazione ben diversa in termini di immatricolazioni dei veicoli elettrici. Nello scenario *Policy Driven* il numero di veicoli elettrici immatricolati è 11 volte maggiore rispetto allo scenario pessimistico e 3,5 volte maggiore rispetto a quello registrato nello scenario conservativo.

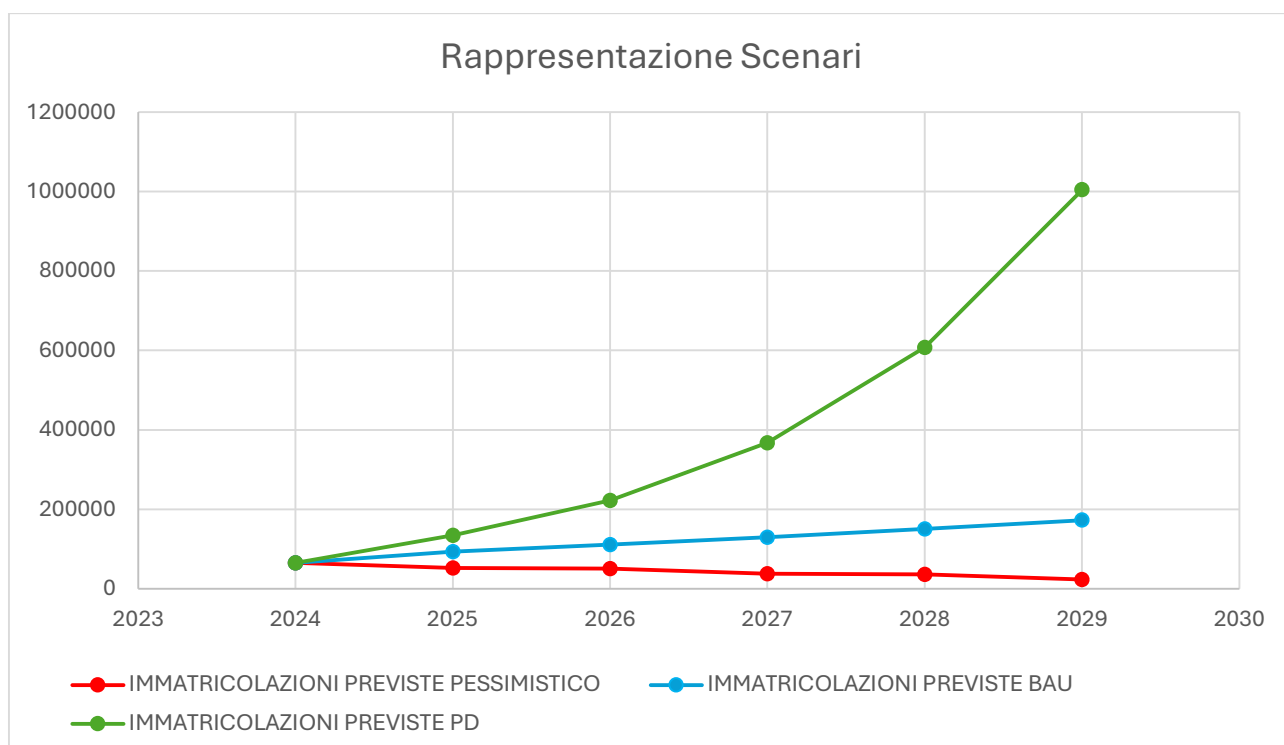


Figura 56: Rappresentazione dell'andamento delle nuove immatricolazioni di BEV nei diversi scenari

La differenza risulta ancora più evidente nella rappresentazione grafica in Figura 56: Rappresentazione dell'andamento delle nuove immatricolazioni di BEV nei diversi scenari. In Figura 56, in cui lo scenario ottimistico, rappresentato con il colore verde, è ben distanziato dagli scenari *Business as usual* e pessimistico, rispettivamente di colore blu e di colore rosso.

È stato svolto un confronto anche sulla variazione del TCO nei diversi scenari, rispetto al caso base. In Tabella 39 è indicata l'evoluzione del TCO.

Tabella 39: Confronto del valore calcolato del TCO nei diversi scenari di riferimento

Marca	Modello	TCO [€]			
		<i>BASELINE</i>	<i>PESSIMISTICO</i>	<i>BAU</i>	<i>PD</i>
DACIA	Spring	24.034,22	33.783,54	22.790,70	16.526,41
PEUGEOT	E-208	42.503,42	54.749,08	40.183,42	33.740,46
VOLKSWAGEN	ID.3	44.243,05	57.271,67	41.551,85	35.125,14
TESLA	Model 3	52.577,21	58.943,91	50.118,01	43.853,72
BMW	Serie 5	79.616,79	89.289,67	75.723,83	69.240,27

Lo scenario pessimistico è quello in cui si registra un innalzamento del costo totale di proprietà rispetto al caso base. Negli altri due scenari, invece, si verifica una diminuzione del TCO, che risulta più consistente nel caso dello scenario *Policy Driven*.

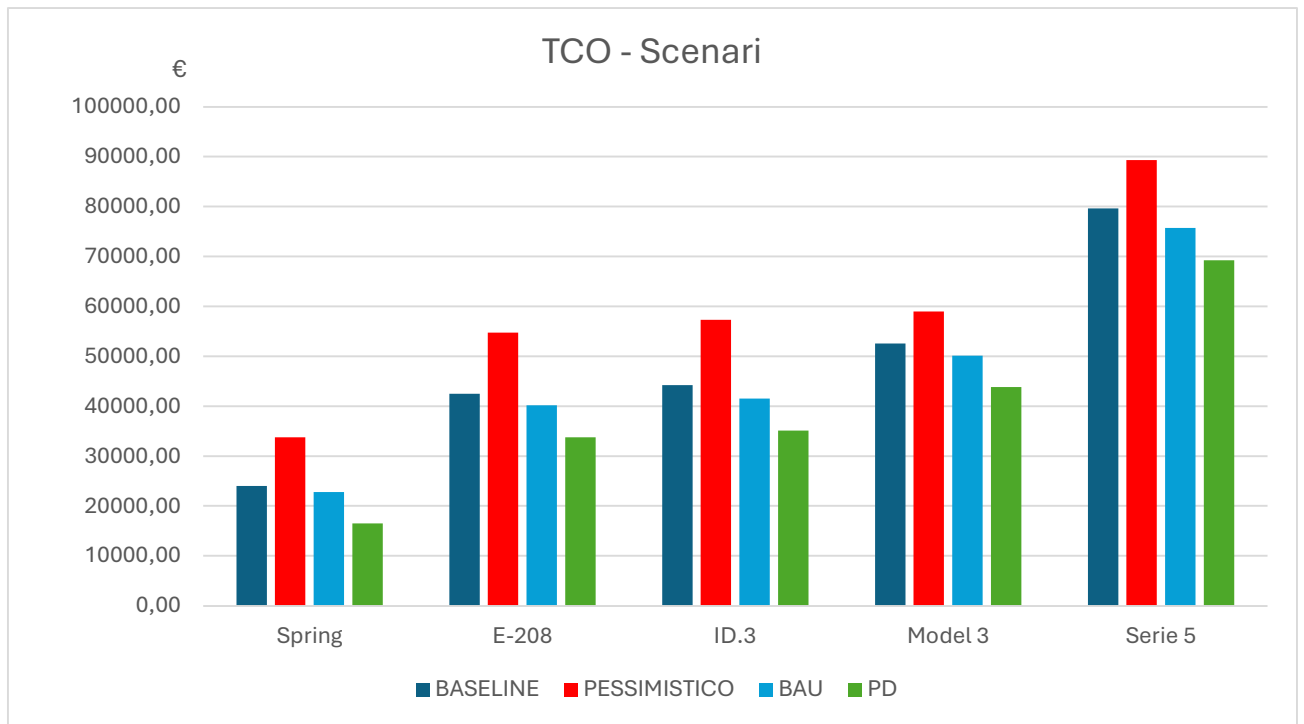


Figura 57: Rappresentazione nel diagramma a barre del TCO calcolato con riferimento alla Tabella 39

Nel diagramma a barre in Figura 57 è raffigurato, per ogni veicolo BEV analizzato, il valore del TCO. Con il colore blu è rappresentato il caso base all'anno 2024. Procedendo verso destra, in colorazione rossa, si osserva il costo totale di proprietà con le ipotesi fatte al paragrafo 5.2 per lo scenario pessimistico. In colore azzurro è raffigurato il TCO calcolato nel caso di scenario *Business As Usual*, mentre in verde quello in caso di uno scenario ottimistico.

CAPITOLO 6: PROPOSTA DI UN MODELLO PER IL RAGGIUNGIMENTO DEL TARGET NEL 2030

In questo capitolo si vuole esaminare l'impatto del numero di veicoli elettrici sulla domanda energetica e sulla resilienza della rete. Bisogna infatti soddisfare sia l'aumento della richiesta energetica negli anni, sia valutare se l'infrastruttura è adeguata in termini di numerosità dei punti di ricarica e di flessibilità operativa.

Si considera lo scenario ottimistico, come scenario di riferimento, in quanto è il modello in cui è presente il maggior numero di veicoli elettrici e *plug-in hybrid*. Con un totale di 4,3 milioni di BEV e 2,3 milioni di PHEV, in prima approssimazione e tenendo conto solo della variazione della tecnologia di trazione all'interno dei veicoli del parco auto italiano, si ha la richiesta energetica riportata in Figura 58 e in Tabella 41.

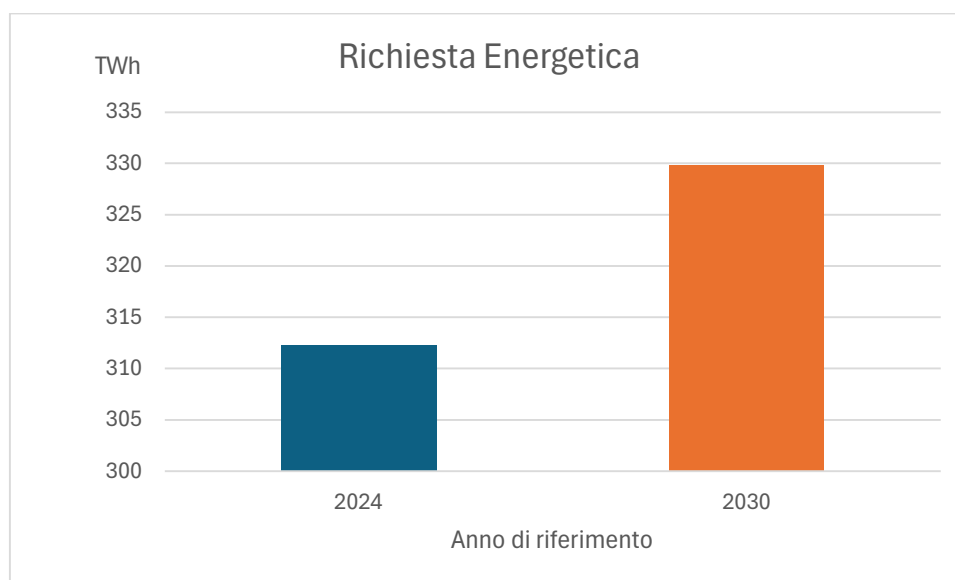


Figura 58: Rappresentazione della richiesta energetica nello scenario base (2024) vs scenario ottimistico (2030)

Tale valore è stato valutato prendendo come riferimento per le auto elettriche un modello standard [57] che presenta le seguenti caratteristiche (Tabella 42):

- Batteria di capacità pari a 53 kWh;
- Consumo medio pari a 15,2 kWh/100 km.

Per le auto ibride plug-in è stato preso come riferimento un veicolo con le seguenti caratteristiche (Tabella 42):

- Consumo, in modalità elettrica pari a 11,3 kWh/100 km;
- Km percorsi in modalità elettrico pari al 50% del totale.

Il valore ottenuto per ciascun autoveicolo è stato moltiplicato per il totale di veicoli in circolazione all'anno 2024 e all'anno 2030 come riportato in Tabella 40.

Tabella 40: Calcolo della richiesta energetica al 2030 in funzione del numero di veicoli BEV e PHEV.

	Numero di veicoli		GWh totali	
	2024	2030	2024	2030
BEV	277.365	4.300.000	881,81	13.670,70
PLUG-IN	298.106	2.300.000	702,16	5.417,43
TOTALE			1.583,97	19.088,13

Tabella 41: Calcolo della richiesta energetica totale al 2024 e al 2030

ANNO	RICHIESTA ENERGETICA [TWh]
2024	312,3
2030	330

Tabella 42: Calcolo dell'energia richiesta da ciascun veicolo di tipo BEV e PHEV

	Consumo medio [kWh/100 km]	Chilometri percorsi in modalità elettrica [km]	Energia totale per veicolo [kWh]
BEV	15,2	20.916	3.179,23
PLUG-IN	11,3	10.458	2.355,41

Al fine di soddisfare i requisiti del nuovo scenario bisogna tenere conto di produzione, infrastruttura di ricarica e integrazione del veicolo con la rete. Questo discorso è stato affrontato anche in letteratura, in particolare si è analizzata la pubblicazione ad opera del CIMET [58].

6.1 Produzione

Per quanto riguarda la produzione, bisogna aumentare i valori attuali. Si stima che la domanda energetica, se si tiene conto della transizione energetica in tutti gli ambiti, dal residenziale, alle industrie, possa passare dagli attuali 312,3 TWh nel 2024 [59], ai 360 TWh nel 2030.

L'obiettivo del Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) nella proposta di aggiornamento è di copertura di consumi energetici da fonti rinnovabili del 40,5% al 2030.

In particolare, il target previsto nel settore dei trasporti è pari al 30,7% al contrario del 22% previsto nel 2019. La produzione da fonti rinnovabili nel 2030 deve essere pari a 227,7 TWh divisi nelle seguenti categorie:

- 46,9 TWh da fonte idrica;
- 99,1 TWh da fonte solare;
- 64,1 TWh da fonte eolica
- 9,6 TWh da bioenergie;
- 8 TWh da fonte geotermica.

Gli aumenti più consistenti si hanno nella generazione da fonte eolica e fotovoltaica mentre si ha un calo dell'apporto da fonte idrica dovuto alle siccità che limitano la produzione.

Si prevede un aumento della potenza installata degli impianti di fonti rinnovabili pari a 95,21 GW. Di questi, si ha un incremento di 57.979 MW di potenza installata di fotovoltaico, di cui 80 MW a concentrazione, portando il valore complessivo a 79.253 MW. Si considera inoltre un incremento pari a 17 GW di eolico portando il valore a 28 GW, di cui 2.100 MW di eolico *off shore*. Si considera inoltre un totale di 19.140 MW per l'energia da fonte idrica escludendo gli impianti di pompaggio puro e misto, 1.000 MW da geotermica e 3.240 MW da bioenergie, per un totale di 131.043 MW, quindi circa 131 GW di impianti a fonte rinnovabile [60].

Tabella 43: Obiettivi di crescita della potenza da fonte rinnovabile al 2030 (MW) [Fonte: RSE, GSE, Terna]

POTENZA INSTALLATA [MW]		
FONTE	2021	2030
Idrica	19.172	19.410
Geotermica	817	1.000
Eolica	11.290	28.140
Bioenergie	4.106	3.240
Solare	22.594	79.253
Totale	57.979	131.043



Figura 59: Rappresentazione delle FER protagoniste della transizione energetica al 2030 [61]

Inoltre, si prevede l'aumento della capacità di accumulo dell'energia per un totale di 6 GW al 2030 per pompaggi e accumulo elettrochimico a livello centralizzato e un valore pari a 4 GW per gli accumuli distribuiti [60].

6.2 Infrastrutture

Per contribuire allo sviluppo delle auto elettriche è necessario che siano presenti delle infrastrutture di ricarica adeguate. Al giorno d'oggi rappresentano uno dei limiti allo sviluppo delle BEV. Pertanto, nei prossimi anni bisogna agire per colmare questo divario. In Italia sono presenti le infrastrutture di ricarica per caricare le batterie, ma in altre parti del mondo si stanno esplorando ulteriori approcci che consentono di ridurre i tempi di ricarica e permettere all'utente di avere un'autonomia superiore.

6.2.1 Colonnine

L'obiettivo è quello di aumentare il numero di infrastrutture di ricarica pubbliche e private ad uso pubblico. Si stima di raggiungere nei prossimi anni in caso di uno scenario conservativo un numero pari a 141.197 punti di ricarica entro il 2029, mentre in caso di uno scenario accelerato il numero deve salire ad almeno 226.000 punti di ricarica all'incirca per l'anno 2030. Questo valore è stato stimato in funzione del numero previsto di BEV circolanti al 2030, mantenendo il rapporto tra PdR e BEV pari a quello considerato nel capitolo 2, e quindi 19 punti di ricarica ogni 100 veicoli elettrici.



Figura 60: Infrastrutture di ricarica TESLA [62]

A ciò si unisce il numero di infrastrutture private per la ricarica domestica, condominiale e in ambito lavorativo che deve essere sviluppato. L'incremento deve avvenire in modo da servire in maniera equa tutte le aree del paese, dai principali centri abitati, alle aree meno popolate, in particolare al Centro-Sud. Le colonnine di tipo fast (Figura 60) devono essere installate in tutte le aree di servizio che risultano sprovviste di un'infrastruttura di ricarica, mentre quelle di tipo lento devono coprire tutti i principali centri abitati che al momento non dispongono di colonnine per la ricarica. Devono essere aumentate nelle città che presentano una densità di popolazione maggiore, per rendere il servizio più accessibile.

6.2.2 Battery swap

Il concetto alla base di questa tecnologia, che si sta sviluppando in Cina, è rendere la ricarica di un veicolo elettrico veloce quanto fare il pieno di carburante. Invece di ricaricare la batteria, la si sostituisce con una già carica all'interno di stazioni specifiche e in pochi minuti. La Nio adotta questo sistema già da qualche anno, che di recente ha avuto attenzione anche dalla CATL, e si vuole standardizzare le batterie per renderle adattabili a diversi modelli. Il tempo medio dichiarato dalla Nio per la sostituzione di un pacco batteria è pari a 144 secondi per una Power Swap Station 4.0 (Figura 61), che può ospitare fino a 23 pacchi batteria e compiere fino a 480 sostituzioni al giorno. Tutto ciò con un funzionamento automatico gestito tramite display all'interno del veicolo e con batterie che possono arrivare a 150 KWh [63].



Figura 61: Rappresentazione di una Power Swap Station 4.0 Nio [64]

La perplessità maggiore sollevata dagli utilizzatori è quella di ricevere una batteria più usurata durante lo scambio. Questo problema è stato in parte arginato stipulando dei contratti di leasing per le batterie, che non sono più di proprietà dell'acquirente, ma vengono gestite dalle stazioni di ricarica stesse. In questo modo le batterie vengono monitorate continuamente e una volta usurate possono essere sostituite. Un ulteriore limite, allo stato attuale, è la poca standardizzazione delle batterie. È infatti necessario un accordo tra i principali gruppi automobilistici per rendere compatibile lo scambio tra veicoli e modelli diversi. Inoltre, uno svantaggio di queste infrastrutture è rappresentato da un elevato costo iniziale.

6.2.3 Infrastrutture a ricarica solare

Si tratta di un sistema di ricarica per veicoli elettrici basato sull'energia solare. Sono impianti costituiti da diverse componenti. È presente un pannello fotovoltaico (Figura 62), o più di uno, che trasforma la radiazione solare in energia elettrica per ricaricare le batterie. L'inclinazione del pannello è gestita da un motore che in base alle condizioni meteorologiche e al sole controlla la rotazione dell'asse del pannello in modo da massimizzare la ricezione della luce solare. La posizione è quindi definita in base ai comandi che arrivano dai microcontrollori in funzione di un algoritmo che rileva la posizione del sole in base all'ora della giornata. È presente poi un convertitore che ha lo scopo di convertire la potenza generata che non è un uniforme ed è funzione della temperatura e dell'ora. Un ruolo importante è svolto dal sistema di monitoraggio della batteria (BMS) che comunica con

l'infrastruttura di ricarica per scambiare informazioni riguardo la capacità massima e ulteriori misure relative alle batterie. Tutto il processo è visualizzabile su un'interfaccia che permette di osservare i vari parametri come l'energia prelevata dal sole e l'energia impiegata per ricaricare la batteria.

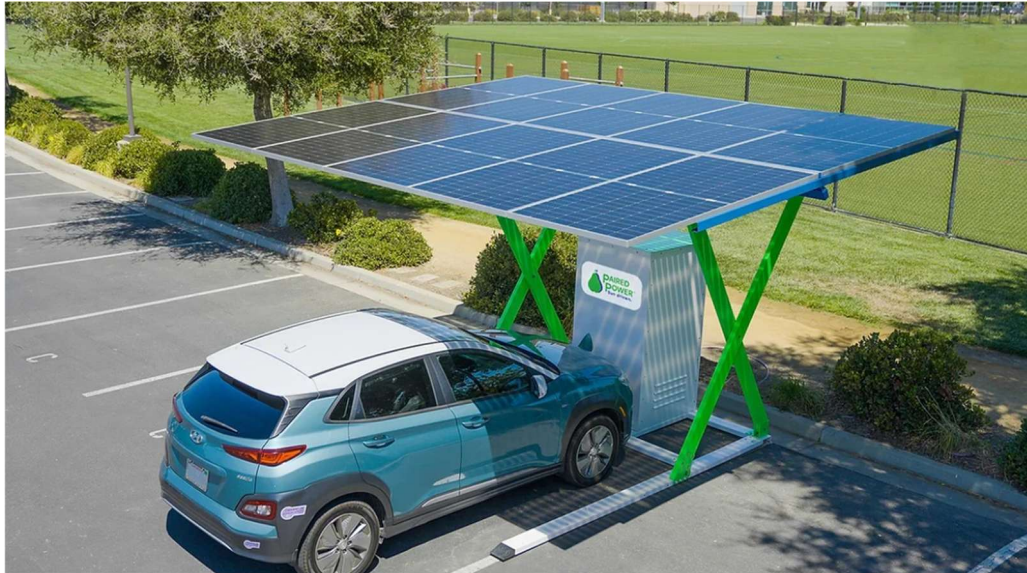


Figura 62: Infrastruttura a ricarica solare [65]

Se l'infrastruttura di ricarica è a corrente alternata è necessario un inverter che ha il ruolo di convertire la DC prodotta dai pannelli in AC. In alcuni casi è presente una batteria che ha lo scopo di stoccaggio dell'energia elettrica anche quando non è disponibile la luce solare. Ciò comporta un aumento dei costi di investimento ma viene superato il limite della ricarica ad intermittenza. Questi sistemi possono essere autonomi o alimentati dalla rete. nel secondo caso prelevano energia dalla rete per effettuare la ricarica, ma ottimizzano i processi in funzione dell'energia solare. Hanno dei costi maggiori ma permettono di eliminare la dipendenza dalla disponibilità della radiazione solare. Tali infrastrutture sono presenti anche nella variante eolica, in cui l'approvvigionamento energetico avviene grazie a uno o più aerogeneratori, invece che da pannelli fotovoltaici.

6.3 Vehicle grid interaction

Uno degli aspetti che è interessante approfondire nello scenario ottimistico è l'integrazione dei veicoli elettrici nella rete. Si tratta di uno scambio di energia e di informazioni tramite adeguate infrastrutture e protocolli di comunicazione che consente di avere diverse modalità di utilizzo del veicolo. Sono presenti diversi tipi di interazione. Di seguito verranno descritti.

6.3.1 V2G

Il *Vehicle to Grid* (V2G) è una tecnologia che consente di avere una rete integrata e maggiormente flessibile (Figura 63). Il veicolo diventa un vettore energetico in grado di scambiare energia elettrica con la rete pubblica. In questo modo il veicolo passa dalla condizione di *consumer* a quella di *prosumer* e contribuisce al *peak shaving*, ovvero alla riduzione del picco di consumo energetico durante i periodi di punta. In questi momenti la domanda di energia elettrica si alza notevolmente e la rete si trova in difficoltà per poter bilanciare i carichi in maniera sostenibile. Grazie al V2G si ha una gestione intelligente, in cui il sistema di gestione monitora i flussi di energia e decide quando ricaricare e quando scaricare il veicolo in base a diversi fattori, come la disponibilità di fonti energetiche rinnovabili, la domanda energetica, il prezzo dell'energia e la carica del veicolo.

In questa modalità di funzionamento il veicolo immagazzina l'energia durante le ore notturne. Si ricarica quando la domanda energetica è bassa, o quando si ha un eccesso di produzione da rinnovabile, e lo restituisce durante il giorno o nei momenti in cui la richiesta energetica si alza. Si genera un flusso bidirezionale di energia tra veicolo e infrastruttura di ricarica che segue un programma di *time shifting*, ovvero di movimentazione dell'energia in base alla convenienza costo-orario. Ciò si traduce non solo in vantaggi dal punto di vista ambientale, ma anche di natura economica. Infatti, si utilizzano le batterie dei veicoli come storage, piuttosto che installarne di nuove, e il proprietario del veicolo viene incentivato attraverso delle tariffe vantaggiose, in modo da rientrare prima nei costi di investimento.

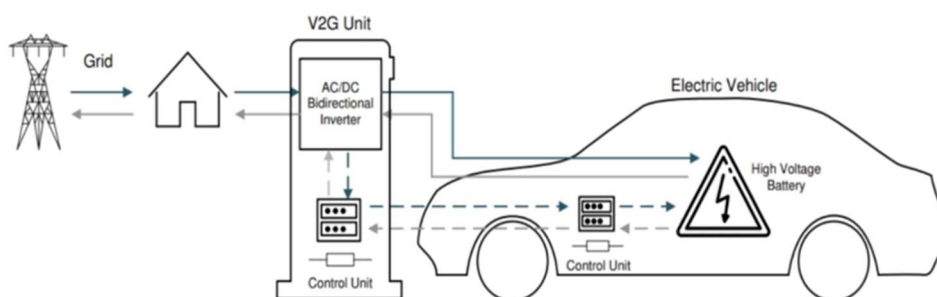


Figura 63: Rappresentazione del funzionamento di ricarica secondo il V2G [66]

Affinché il V2G si possa realizzare, la sosta del veicolo deve essere sufficientemente lunga da poter permettere almeno un ciclo di carica e scarica della batteria. Inoltre, il veicolo deve essere abilitato a tale funzionalità e anche l'infrastruttura deve essere di tipo bidirezionale, altrimenti non è possibile lo scambio delle informazioni e di conseguenza del flusso di energia. Tali infrastrutture sono più complesse e costose perché sono dotate di un inverter in grado di trasformare la corrente continua della batteria in corrente alternata per la rete. Sono anche dotate di software complessi che controllano la potenza, la tensione e tutti i dati relativi

al veicolo elettrico. Ciò costituisce un problema relativo alla *cybersecurity*, infatti si può verificare una fuga di informazioni, che oltre ad impedire l'accesso da remoto del veicolo può causare anche il mancato controllo diretto del veicolo alla guida. Tra gli svantaggi di questa tecnologia, oltre agli aspetti di natura culturale e sociale, va esaminata la degradazione delle batterie. Infatti, aumentando il numero di cicli di carica e scarica di una batteria si ha una deteriorazione più veloce rispetto all'utilizzo monodirezionale [67]. Questa tecnologia pertanto può essere impiegata, previa valutazione dell'autonomia minima del veicolo e del comportamento dell'utente. Solo in questo modo possono essere rispettati i tempi minimi di ricarica e il servizio può essere accettato anche dai consumatori più scettici. Occorre quindi modellare con precisione il parco macchine futuro, l'infrastruttura, la trasmissione e la domanda energetica e introdurre una normativa relativa alla sicurezza del processo, alla regolamentazione, alla gestione e all'incentivazione degli utenti.

6.3.2 V2H

Il *Vehicle to Home* (V2H) è una tecnologia che funziona in maniera analoga al V2G. Tuttavia, in questo caso l'infrastruttura di ricarica è di tipo domestico (Figura 64). Si tratta di una *Wallbox* bidirezionale che consente di scambiare informazioni ed energia tra il veicolo e l'utenza domestica. In questo modo la batteria del veicolo viene sfruttata come storage per l'abitazione e si risparmia sulla bolletta elettrica. Il veicolo viene caricato durante le ore in cui l'energia costa meno e cede energia durante le ore in cui i costi sono più elevati.

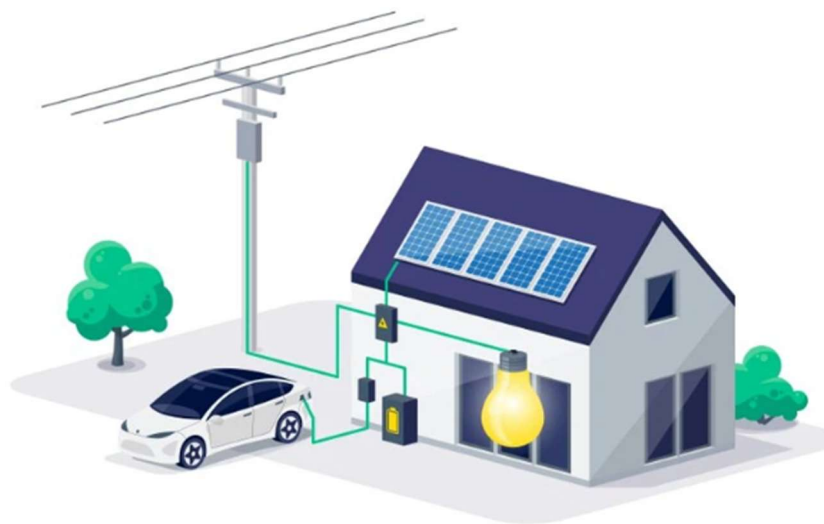


Figura 64:Raffigurazione dello schema di funzionamento secondo il V2H [68]

Una situazione ottimale è quando è installato un impianto fotovoltaico e in tal caso il veicolo viene caricato grazie alla fonte energetica rinnovabile e, scaricato in caso di necessità. Il vantaggio di questo sistema rispetto al V2G è che il V2H è circoscritto all'utenza domestica.

Quindi, i benefici in termini economici e di rete sono locali e non si ha fuga di informazioni. Anche in questo caso il veicolo deve avere i requisiti necessari per stabilire una comunicazione di tipo bidirezionale.

6.3.3 V2L

Il *Vehicle to Load* (V2L) è la tecnologia più semplice tra quelle descritte. Il veicolo, dotato di questa funzionalità, funge da batteria per alimentare dei dispositivi di vario genere (Figura 65). Se il dispositivo è piccolo può essere ricaricato anche durante il movimento, mentre se è molto energivoro, il veicolo deve essere fermo. È una tecnologia presente anche su furgoni e mezzi da lavoro ed è più immediata da realizzare poiché non si hanno interazioni tra la rete e il veicolo.

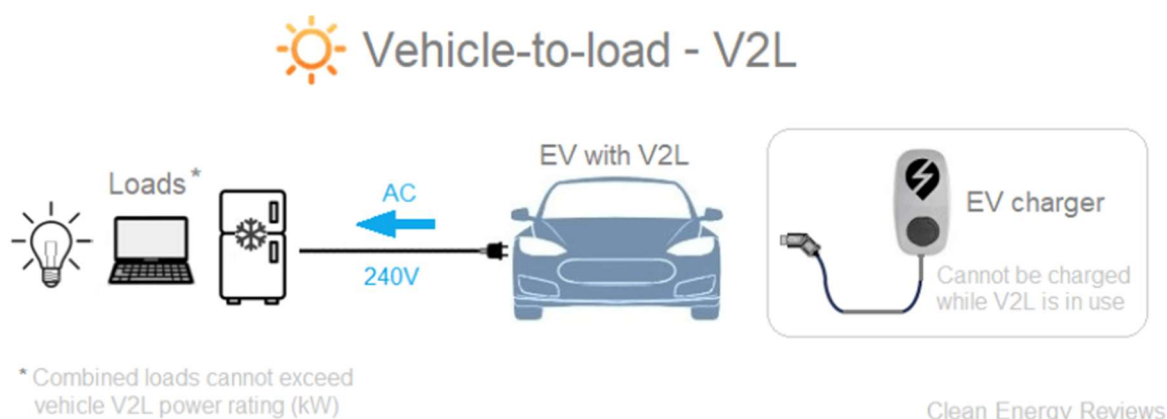


Figura 65: Rappresentazione dello schema di funzionamento secondo il V2L [69]

Si hanno dei vantaggi in termini economici, limitati però se confrontati con i casi precedentemente descritti. Sono pochi i veicoli che offrono questa possibilità e sono dotati di strumenti in grado di convertire la corrente continua delle batterie in corrente alternata per alimentare i dispositivi. La potenza erogata è di solito compresa tra i 2 kW e i 3 kW e la corrente varia tra i 10 A e i 15 A [70]. Il flusso di energia può avvenire per mezzo di una presa all'interno dell'abitacolo o per mezzo di un adattatore da inserire nella porta di ricarica del veicolo. L'energia disponibile dipende dallo stato di carica della batteria. Se la batteria è scarica, tale funzionalità viene disabilitata.

6.4 Modello su ETM

È stato formulato un modello sul programma *Energy Transition Model* (ETM) con l'obiettivo di valutare l'evoluzione di possibili sistemi energetici. Questo software consente di modellare uno scenario futuro per diversi Paesi. Nello specifico è stato scelto come territorio di riferimento l'Italia all'anno 2030. Il programma parte dall'analisi della

situazione italiana al 2019 per mostrare poi i cambiamenti in base alle ipotesi inserite nelle schede opportune.

Il modello si basa su degli obiettivi che si vogliono raggiungere nei vari ambiti di un sistema energetico, modificando i diversi settori. Consente di ottenere una variazione delle emissioni nei diversi ambiti, confrontando il valore di riferimento del 1990 con lo scenario futuro. Fornisce inoltre una panoramica della domanda totale di energia, mettendo in evidenza quali settori sono più energivori e quali meno.

Nella Figura 66 è presente un'indicazione dei principali parametri per l'anno di riferimento nel programma.

Energy use ⓘ	CO ₂ relative to 1990 ⓘ	Energy imports ⓘ	Costs (bln/yr) ⓘ	Renewables ⓘ	Blackouts ⓘ	Biomass import ⓘ
+2.9%	-9.4%	80.5%	€91.6	18.7%	0 h/yr	37.9%

Figura 66: Output del modello calcolati dal software ETM all'anno di riferimento

6.4.1 Definizione degli input

Per ottenere quello che è lo scenario futuro bisogna modificare le singole schede che vengono indicate in Figura 67.

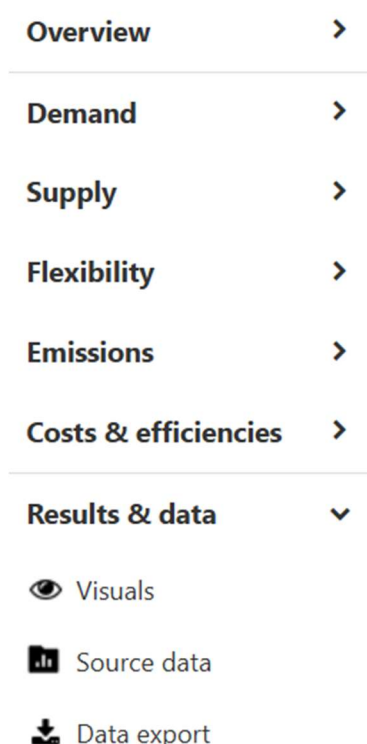


Figura 67: Schede presenti sul software per modificare i parametri di input del modello

In *Overview* è presente una panoramica dei dati principali. In seconda posizione è presente la scheda *Demand* che è quella in cui si definiscono gli utilizzi dell'energia. Se non si effettuano modifiche in questa sezione, la domanda energetica rimane la stessa. Per questo settore si possono definire la richiesta di energia per diversi utilizzi: ambito domestico,

settore degli edifici pubblici, il settore dei trasporti, l'industria, l'agricoltura e altri utilizzi relativi all'efficienza. In ognuna di queste voci si ha la possibilità di modificare i parametri relativi alla popolazione, alla richiesta energetica per raffrescare o riscaldare, alle risorse necessarie per il riscaldamento dell'acqua calda ad uso sanitario, agli elettrodomestici, ai dispositivi e all'illuminazione. Il grado di dettaglio è elevato, infatti si può anche modellare quello che è il comportamento dell'utente finale in ottica di una migliore gestione delle risorse e di sensibilità nei confronti dell'ambiente.

In questa sezione è stata modificata la scheda riferita al settore trasporti, in particolare ciò che riguarda il trasporto di passeggeri. È stata definita la percentuale di utilizzo dei principali mezzi di trasporto, con l'auto come mezzo di trasporto principale. Si è specificato il cambiamento futuro e la tecnologia veicolare adottata nell'anno dell'analisi. Questo è stato possibile andando a modificare la percentuale di BEV in circolazione al 2030 e portando questo valore dallo 0,5% dell'anno di riferimento al 13% circa (Figura 68). Questa percentuale è un valore indicativo e tiene conto in minima parte anche della presenza dei PHEV che non si possono inserire singolarmente all'interno dello scenario.

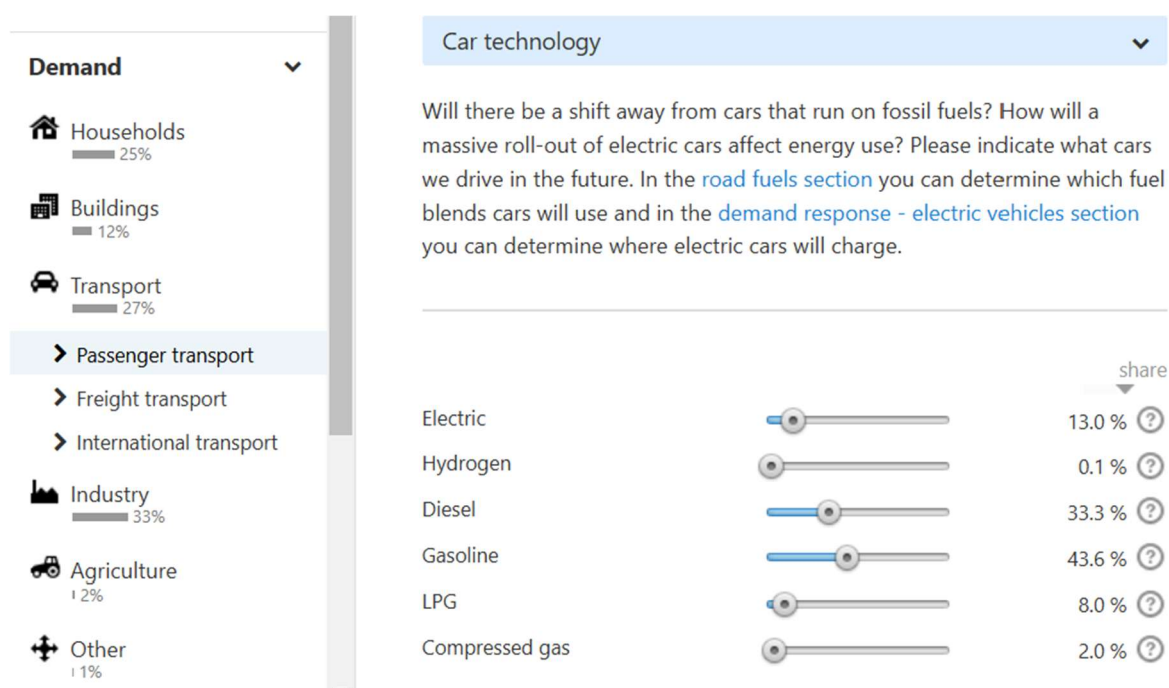


Figura 68: Definizione della percentuale delle diverse tecnologie veicolari all'anno 2030

In seguito, si è modificata la scheda *Supply*, andando a definire la produzione di energia elettrica al 2030 secondo le linee guida del PNIEC, inserite nel paragrafo 6.1. Si è tenuto conto della dismissione delle centrali a carbone che hanno un forte impatto sulla produzione di CO_2 e sono poco regolabili, e contestualmente si è inserito il valore previsto di potenza da installare per le FER (Figura 69).

Demand >

Supply v

⚡ Electricity

🔌 Renewable electricity

🏠 Merit order

🔥 District heating

H₂ Hydrogen

🚗 Transport fuels

🌿 Biomass

🏭 Fuel production

Renewable electricity

Wind turbines >

Solar power >

Hydroelectric power >

Biomass plants >

Waste power >

Hydrogen plants >

Geothermal v

The potential of geothermal power is not very well known in many countries.
How much do you think could be produced?

Figura 69: Definizione della potenza installata per la produzione da FER

Successivamente si è passati al settore *Flexibility* che è quello in cui si va a definire la flessibilità e quindi il bilanciamento tra l'offerta e la domanda (Figura 70). Si sono definite le capacità dello storage, in accordo con quanto definito dal PNIEC, e inserendo dei valori di riferimento per le auto. In questo scenario i BEV diventano, vettori energetici in grado di immagazzinare l'energia elettrica per 9 ore, e con una capacità della batteria pari all' 80% del totale, e rilasciarla quando la richiesta di energia aumenta, attraverso dei cicli di carica e scarica della batteria [57]. Si è inoltre deciso di impostare un interruttore che permette l'utilizzo di un algoritmo di previsione per migliorare l'utilizzo dello storage in previsione del carico residuo.

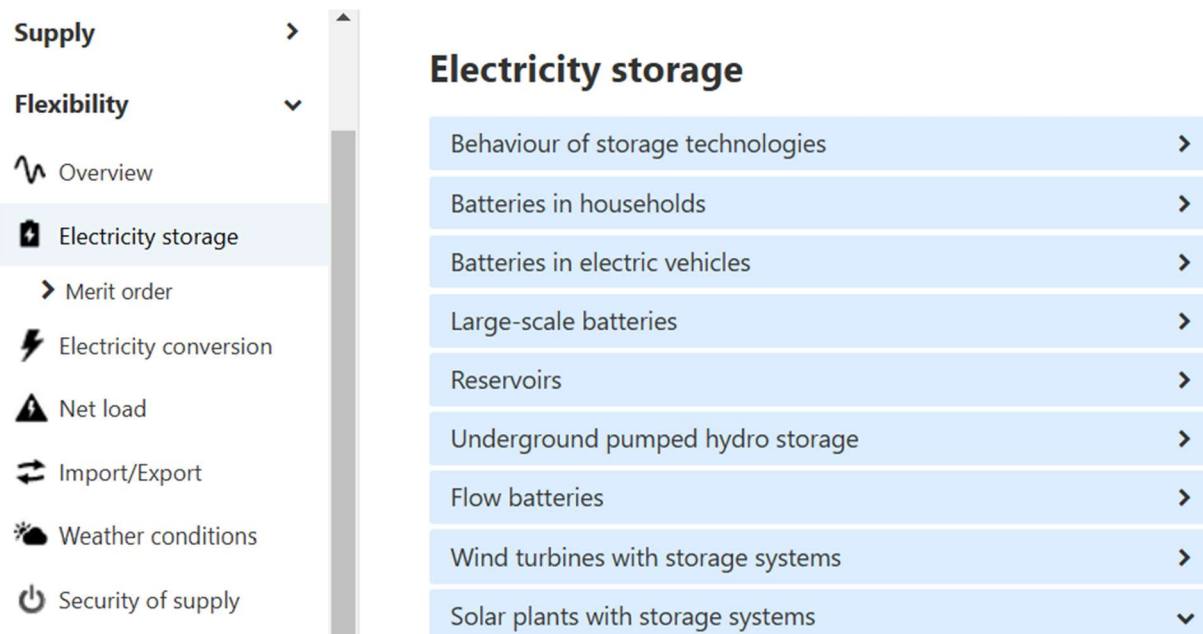


Figura 70: Definizione delle dimensioni e della tipologia di storage all'anno 2030

Nella scheda successiva, *Emissions*, viene calcolata la quantità di CO_2 e di altri GHG in funzione dell'utilizzo dell'energia descritto nelle schede antecedenti (Figura 71).

Total greenhouse gas emissions (CO_2 eq)

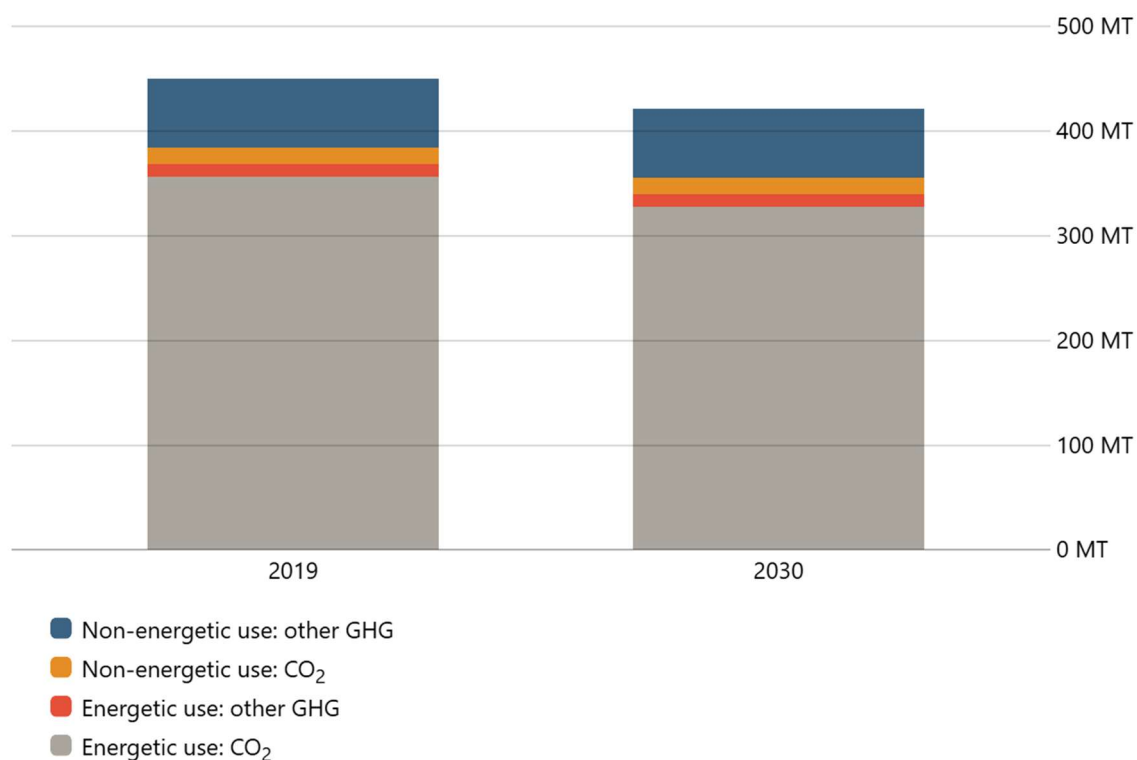


Figura 71: Confronto dei livelli di emissione tra l'anno di riferimento (2019) e l'anno del modello (2030)

Si tiene conto anche delle emissioni di gas serra che derivano da attività non energetiche, come il metano prodotto dal letame in agricoltura e, delle emissioni indirette di metano, monossido di carbonio e composti organici volatili non metanici nei diversi settori.

Infine, nella scheda *Costs & Efficiencies* si tiene conto del costo e dell'efficienza degli impianti, sia in termini di costi di installazione, che di costi O & M. Si considera il miglioramento tecnico annuale in termini di efficienza percentuale e l'effetto che tale miglioramento ha sui costi di produzione del tipo di energia considerato.

6.4.2 Visualizzazione degli Output

In seguito alla compilazione delle singole schede è stato possibile visualizzare gli output.

È presente in Figura 72, la barra che raffigura i principali parametri dello scenario modellato.

Energy use ⓘ	CO ₂ relative to 1990 ⓘ	Energy imports ⓘ	Costs (bln/yr) ⓘ	Renewables ⓘ	Blackouts ⓘ	Biomass import ⓘ
+0.8%	-18.7%	76.0%	€109.3	23.9%	0 h/yr	52.3%

Figura 72: Output del modello calcolati dal software ETM all'anno 2030

Il primo diagramma ad essere ottenuto è quello riportato in Figura 73 e indica la domanda finale di energia per le automobili in funzione della tecnologia.

Final energy demand for cars per technology

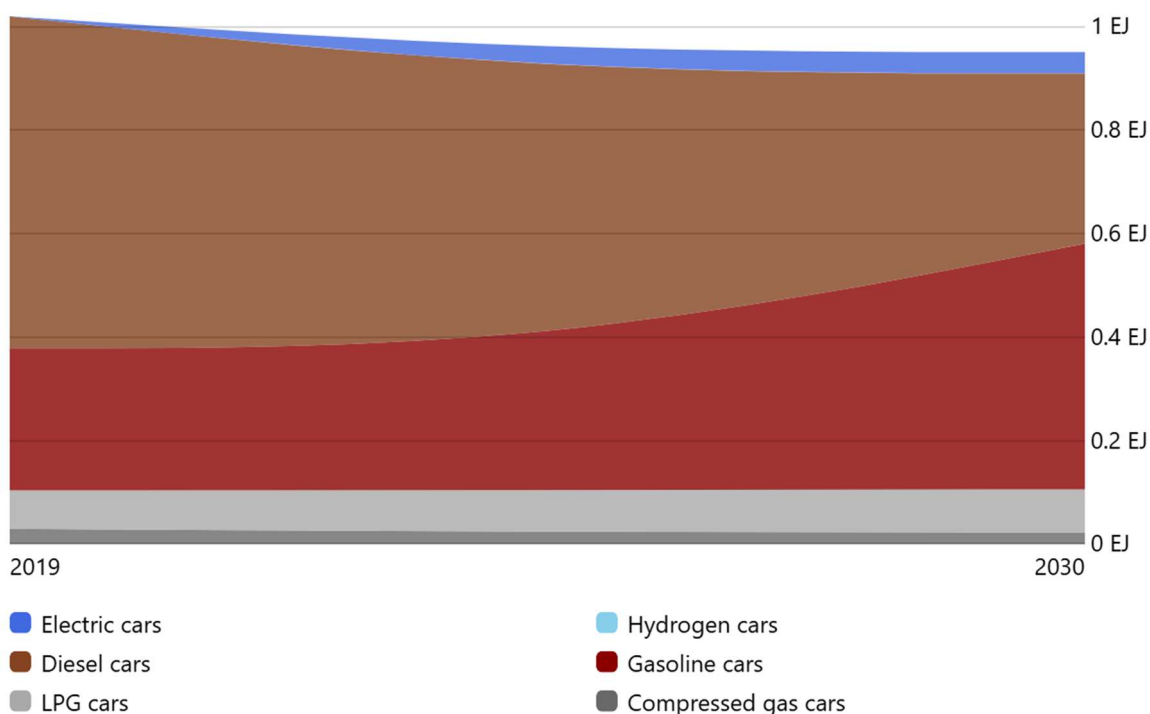


Figura 73: Domanda energetica per le auto in funzione della tecnologia veicolare

Si osserva che nel corso degli anni la domanda energetica relativa alle auto elettriche aumenta, passando da 0 EJ nel 2019 a 0,041 EJ nel 2030. La domanda energetica relativa

alle auto Diesel diminuisce, mentre quella delle auto a Benzina aumenta per via dello sviluppo delle auto ibride di tipo MHEV, HEV e PHEV. Anche la richiesta energetica dovuta alle auto a GPL aumenta leggermente, mentre diminuisce quella di CNG. La richiesta energetica per i BEV ottenibile dal grafico risulta essere quindi:

$$0,041 EJ = 11.388,9 GWh \quad (21)$$

Questo valore è diverso da quello calcolato in prima approssimazione all'inizio del capitolo 6. La differenza è imputabile alla mancanza delle auto PHEV all'interno del modello e alle diverse ipotesi sul singolo veicolo e sul chilometraggio medio che il programma mette in atto rispetto al caso studio considerato. Tuttavia, il valore risultante per i BEV è confrontabile, l'ordine di grandezza è lo stesso e la differenza di energia totale non è elevata, se si considera che si tratta di modelli basati su alcune approssimazioni semplificative.

In seconda posizione si osserva la riduzione percentuale della CO₂ rispetto al riferimento del 1990. Dal grafico riportato in Figura 74 è possibile osservare una diminuzione generale delle emissioni pari al 18,7%.

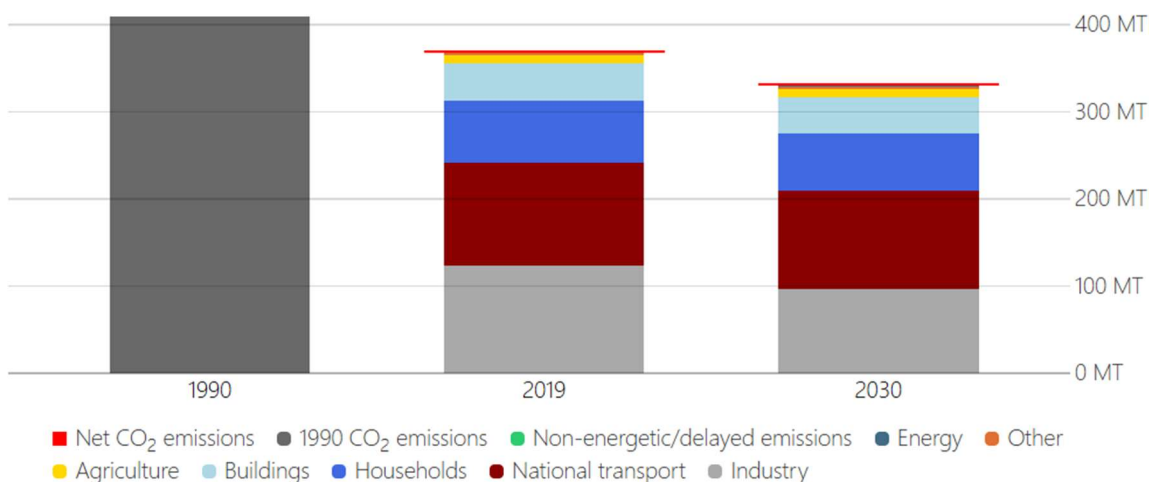


Figura 74: Emissioni in funzione dell'anno di riferimento - da sinistra verso destra rispettivamente anno 1990, anno 2019, anno 2030

Questo risultato è ottimo, seppur inferiore al 55% previsto, se si considera che è dovuto solo al cambiamento di una parte del parco auto italiano, e a un maggiore impiego delle FER. Infatti, in questo modello non si è tenuto conto delle modifiche previste nelle altre tecnologie di produzione dell'energia elettrica, ma anche dei cambiamenti nei settori più energivori, come quello industriale, e dell'eliminazione graduale dei combustibili fossili nel settore dei trasporti pesanti. Inoltre, per ottenere una maggiore riduzione delle emissioni bisogna intervenire anche nel settore domestico e in quello degli edifici pubblici andando a realizzare

sistemi di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda che utilizzano pompe di calore al posto di bruciatori a gas di tipo tradizionale. Inoltre, bisogna tenere conto delle riqualificazioni edilizie e dell'introduzione di sistemi più efficienti nel settore dell'illuminazione, degli elettrodomestici e dei dispositivi da lavoro.

In Figura 75 si osserva la produzione oraria di elettricità.

Electricity production per hour

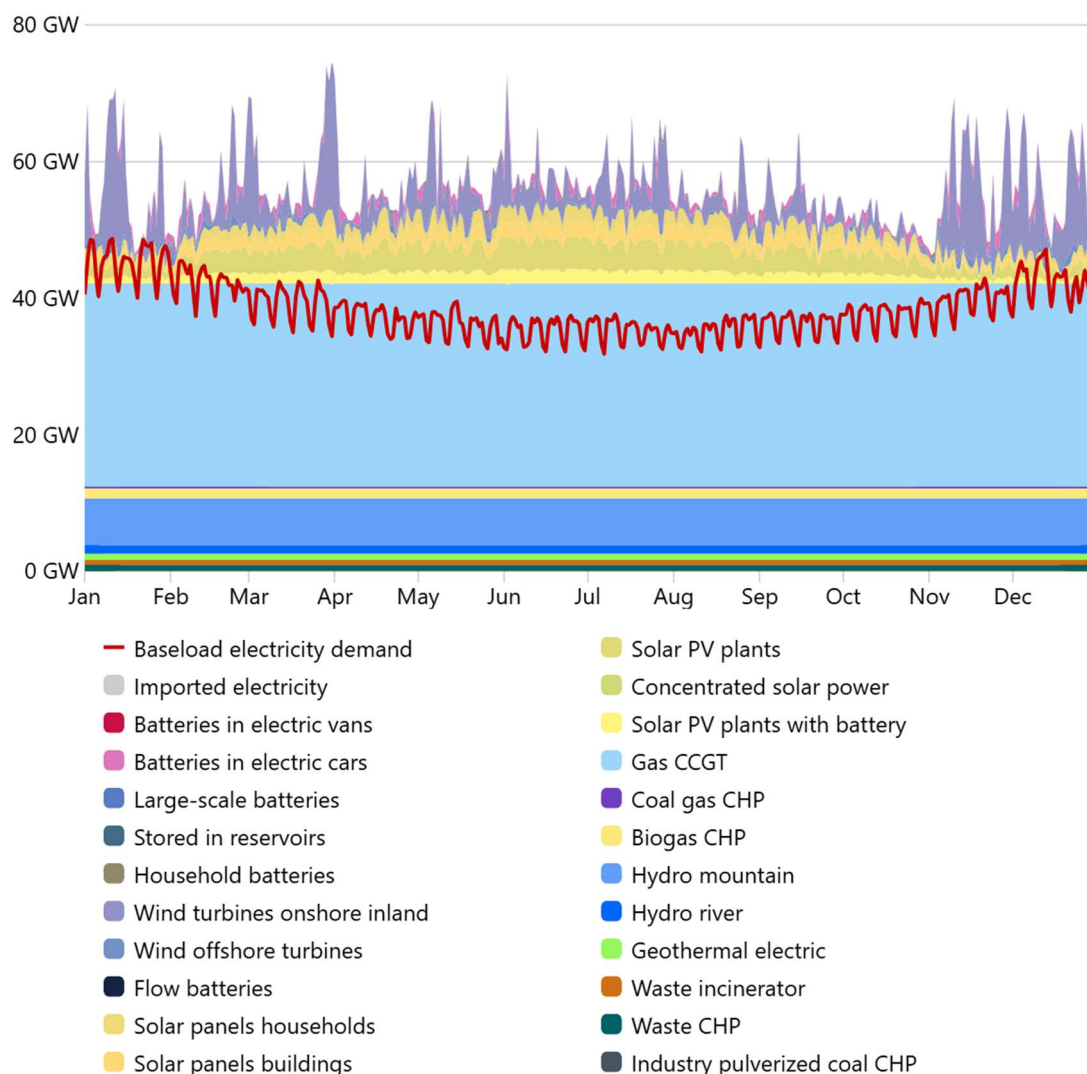


Figura 75: Produzione e domanda oraria di energia elettrica all'anno 2030

In questo modello si evince un eccesso di produzione di energia elettrica per un totale di 284 ore/anno. Ciò costituisce un duplice spunto di riflessione: si può pensare di ridurre la produzione di energia elettrica dalle centrali elettriche, abbassando ulteriormente i costi di produzione dell'energia e i livelli di inquinamento. D'altro canto, un eccesso di produzione rappresenta il potenziale di questo scenario che può essere sfruttato al meglio con

l'introduzione dei diversi tipi di storage, da quelli ad accumulo elettrochimico, ai pompaggi, e dalle batterie dei veicoli a quelle delle abitazioni. Con tali sistemi si può utilizzare l'energia in un secondo momento, impiegandola per la produzione di altra energia elettrica, per il riscaldamento e per la sostituzione del gas naturale.

Si è valutata, inoltre, la variazione della produzione rispetto al 2019, che è osservabile nel diagramma raffigurato in Figura 76.

Electricity production

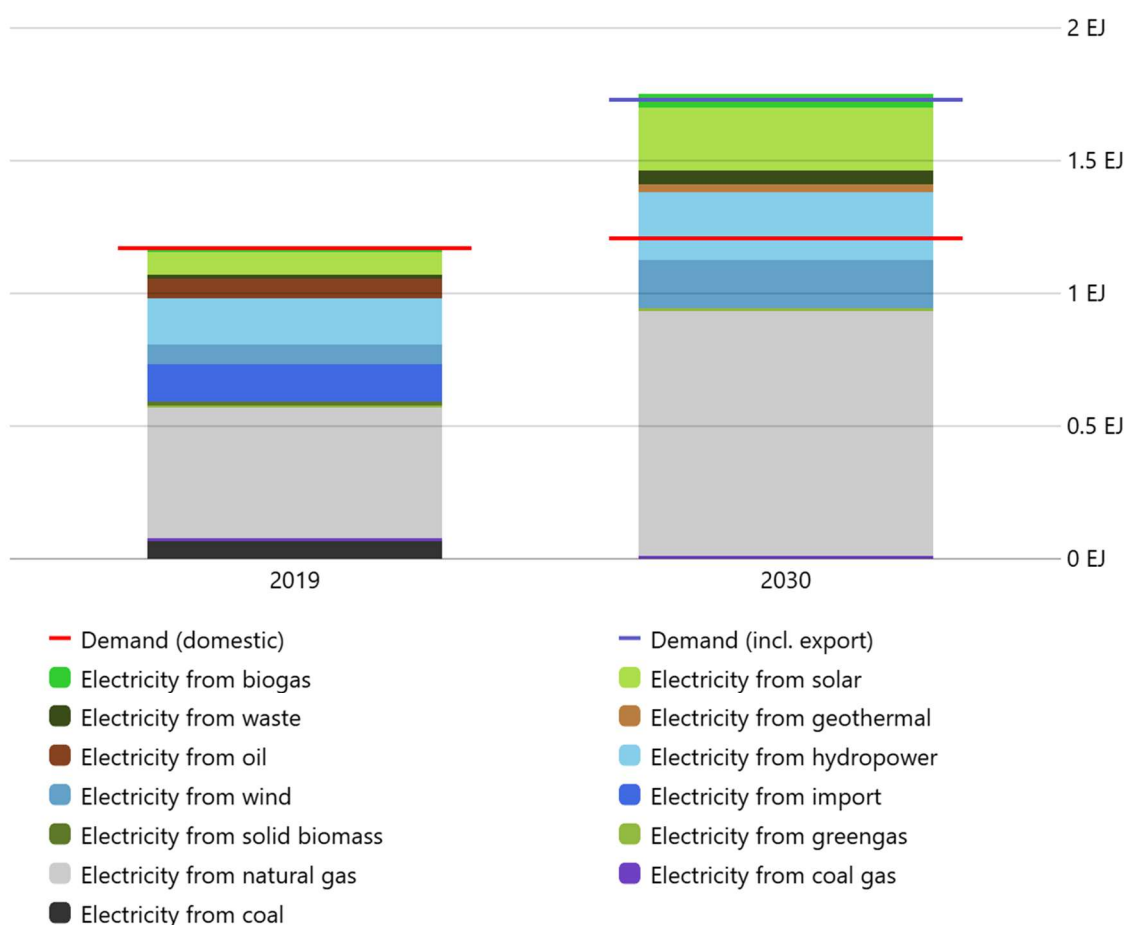


Figura 76: Confronto produzione di elettricità - anno corrente (2019) e anno del modello (2030)

Si osserva un incremento delle FER e un azzeramento della produzione dell'energia dal carbone. Le centrali a gas continuano ad avere un ruolo preponderante per la produzione di energia e sono non remunerative in questo modello. Si può pensare di ridurre l'utilizzo di questi impianti e considerare una produzione che rimane all'incirca costante rispetto all'anno di riferimento.

Settando questa impostazione, i principali parametri del modello diventano quelli riportati in Figura 77:

Energy use ⓘ	CO ₂ relative to 1990 ⓘ	Energy imports ⓘ	Costs (bln/yr) ⓘ	Renewables ⓘ	Blackouts ⓘ	Biomass import ⓘ
-5.4%	-23.3%	74.4%	€104.6	26.4%	0 h/yr	51.3%

Figura 77: Output modello con riduzione di produzione da centrali a gas - anno 2030

Si ha una riduzione delle emissioni e dei costi e un maggiore sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili. Le ore di blackout sono assenti e diminuiscono le quantità di energia e di biomassa importata.

CONCLUSIONI

Dall'analisi condotta sullo stato dell'arte delle tecnologie veicolari esistenti, sia tradizionali che alternative, si evince che i BEV rappresentano un ruolo fondamentale nella transizione energetica nel settore dei trasporti. Con la loro tecnologia sicura ed efficiente garantiscono una riduzione delle emissioni e consentono di contrastare la produzione locale di inquinanti, con effetti positivi maggiormente nei principali centri urbani. È stato implementato un modello generale per il calcolo del costo totale di proprietà sulla base della letteratura esistente sia sul territorio nazionale che su quello europeo. Applicando tale modello al caso studio, costituito da 16 veicoli, di diverso segmento e con motorizzazioni differenti si comprende che al momento i veicoli elettrici sono la forma di trasporto più conveniente. Infatti, dall'analisi si evince che in tre dei cinque segmenti analizzati i BEV hanno un TCO inferiore rispetto agli ICEV. L'eccezione è rappresentata dai veicoli di segmento B, in cui presenta il TCO inferiore il veicolo alimentato a GPL. Negli altri casi invece, la convenienza di un BEV è dovuta alle numerose agevolazioni all'acquisto e nella gestione quotidiana. I veicoli elettrici presentano degli OPEX bassi, che consentono, soprattutto su lunghi chilometraggi annuali, l'ammortamento del prezzo di vendita superiore. Dall'analisi di sensitività condotta si riscontra che la convenienza maggiore di un BEV si ha usufruendo degli incentivi all'acquisto e nell'utilizzo quotidiano con ricariche gratuite sfruttando l'impiego di FER. I BEV sono la scelta migliore anche se caricati alla tariffa dell'utenza domestica, mentre diventano meno convenienti se si fa riferimento alle tariffe considerate sulle infrastrutture di ricarica pubbliche, in particolare quelle di tipo fast.

Dall'analisi del dataset storico, nel capitolo 5, si evince che questa tecnologia ha avuto difficoltà a diffondersi in Italia e solo di recente sta iniziando a svilupparsi. Ciò è dovuto a un miglioramento delle performance tecniche, a un numero di infrastrutture in crescita e ad un maggiore numero di modelli in vendita sul mercato, in grado di soddisfare le esigenze degli utilizzatori. Sono presenti però ancora degli ostacoli nell'utilizzo di un BEV che si traducono in una ridotta autonomia, un costo di acquisto più elevato e la mancanza di un'infrastruttura di ricarica pubblica capillare sul territorio italiano e accessibile a tutti. I tempi di ricarica, inoltre, non sono sempre compatibili con tutti i profili di utilizzazione.

Nell'analisi di scenario si è modellata la vendita di BEV in funzione di caratteristiche tecniche, economiche e politiche, come il costo delle batterie e la variazione degli incentivi da parte dello Stato. Si è osservato che i tre scenari differiscono notevolmente per il numero totale di immatricolazioni all'anno 2029 e per il TCO, che è maggiore nello scenario

pessimistico rispetto al caso base, mentre è ridotto seppur di poco per lo scenario conservativo. Lo scenario pessimistico è caratterizzato da un crollo delle vendite dei BEV, dovuto ad un insieme di condizioni sfavorevoli, mentre nello scenario conservativo si è ipotizzato un progresso tecnologico e uno sviluppo politico coerente con quello degli anni precedenti. Anche le vendite seguono un andamento coerente con quello registrato nel decennio precedente, che risulta però insufficiente nel raggiungimento degli obiettivi previsti per il 2030. Tali obiettivi vengono raggiunti solo nel caso di uno scenario *Policy Driven* in cui il TCO risulta più basso. Questo è dovuto alla presenza di numerose agevolazioni economiche e fiscali sulla base del modello norvegese e dei Paesi Europei più virtuosi. Tale scenario presenta un numero di infrastrutture di gran lunga superiore ai precedenti ed è il più interessante da analizzare per valutare la resilienza della rete e l'integrazione del veicolo con la rete stessa.

Si sono esplorate, nel capitolo 6, le sfide future da affrontare all'anno 2030 per permettere, in caso di scenario ottimistico, la penetrazione su ampia scala di questa tecnologia nel parco veicolare italiano. Bisogna agire su tre fronti in contemporanea; incrementare la produzione di energia da FER, migliorare e aumentare la numerosità delle infrastrutture di ricarica e stabilire uno scambio di informazioni ed energia bidirezionale tra il veicolo e la rete. Sono stati forniti dei suggerimenti in termini di diversificazione delle infrastrutture con sistemi che adottano lo scambio delle batterie o la produzione in loco da FER. I dati ottenuti sono stati inseriti all'interno di un software in grado di proiettare i consumi e le emissioni future in funzione della domanda e della richiesta energetica, ma anche della flessibilità della rete. I veicoli, come mostra il modello generato su ETM diventano *prosumer* con un ruolo centrale, quello di vettore energetico, all'interno del quadro generale della transizione energetica, andando ad abbattere i costi dello storage e garantendo una più efficiente gestione delle risorse. Sono numerose le sfide da affrontare affinché il V2G venga gestito nel modo più sicuro ed efficiente, senza intaccare l'utilizzo del veicolo in condizioni ottimali.

Globalmente, allo stato attuale i BEV sono adatti per la maggior parte degli utilizzatori poiché presentano dei valori di autonomia più che sufficienti a soddisfare le esigenze in termini di spostamento medio per la popolazione italiana. Tuttavia, affinché la transizione energetica possa avvenire nel modo corretto, i cambiamenti da mettere in atto sono tanti, e non solo di natura economica e ingegneristica, ma anche dal punto di vista sociale e culturale. Mostrando le potenzialità di questo sistema, i benefici economici e ambientali per gli utilizzatori, anche i più scettici potranno ricredersi e decidere di acquistare un veicolo elettrico a batteria.

Appendice A

Di seguito vengono riportati i costi medi annuali della manutenzione ordinaria di alcuni marchi di veicoli. Tali valori sono stati calcolati in funzione di un chilometraggio annuo di circa 20.000 km e sono il risultato di statistiche e analisi di mercato.

Marca	Costo medio annuale di manutenzione ordinaria
Toyota	230 euro
Suzuki	240 euro
Dacia	250 euro
Fiat	250 euro
Kia	250 euro
Lancia	250 euro
Peugeot	250 euro
Renault	250 euro
Seat	250 euro
Skoda	250 euro
Ford	260 euro
Hyundai	260 euro
Citroën	270 euro
Honda	280 euro
Opel	280 euro
Smart	280 euro
Alfa romeo	300 euro
BMW	300 euro
Chevrolet	300 euro
Jeep	300 euro
Mazda	300 euro
Mini	300 euro
Mitsubishi	300 euro
Nissan	300 euro
Volkswagen	300 euro

Lexus	350 euro
Subaru	350 euro
Mercedes	400 euro
Volvo	400 euro
Audi	450 euro
Land Rover	550 euro

Appendice B

Di seguito sono riportati gli output generati dal software R per il modello dello Scenario pessimistico. In particolare nella colonna Estimate è presente il valore dei coefficienti stimati dal modello.

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	100756	49291	2.044	0.0869
ns(Batterie, df = 2)1	-186544	91862	-2.031	0.0886
ns(Batterie, df = 2)2	-53026	31080	-1.706	0.1389
ns(Incentivo, df = 2)1	-41651	62500	-0.666	0.5299
ns(Incentivo, df = 2)2	-19130	40156	-0.476	0.6506

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 14240 on 6 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.8573, Adjusted R-squared: 0.7622

F-statistic: 9.014 on 4 and 6 DF, p-value: 0.01037

Si osservano le principali metriche di valutazione del modello, come il residual standard error (RSE), su 6 gradi di libertà e il valore del p-value. Il primo indica la variazione media dei dati dalla retta di regressione, mentre il secondo ci consente di capire se il modello è significativo. Per avere un modello adeguato, l'RSE deve essere il più basso possibile, mentre il p-value deve essere inferiore a 0,05. Altre metriche sono il Multiple R-squared che indica in percentuale quanta variabilità dei dati è spiegata dal modello, l'Adjusted R-squared che tiene conto di una correzione in funzione del numero di variabili impiegate e l'F-statistic che indica se il modello nel suo insieme è significativo.

Appendice C

Di seguito vengono inseriti gli output dei parametri della regressione lineare svolta su R:

Errore quadratico medio: 547.7799

Coefficiente di determinazione R^2 : 0.93914

In Tabella sono indicati i coefficienti che sono stati calcolati dal software R per il modello dello Scenario conservativo.

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	30795.6525	53246.7692	0.578	0.5811
Colonnine	1.2205	0.5462	2.234	0.0606
Batterie	-54.4014	60.6388	-0.897	0.3994
Autonomia	-51.9300	178.0231	-0.292	0.7790

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 13630 on 7 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.8474, Adjusted R-squared: 0.782

F-statistic: 12.96 on 3 and 7 DF, p-value: 0.003033

Si osservano le principali metriche di valutazione del modello, come il residual standard error (RSE), su 7 gradi di libertà e il valore del p-value. Il primo indica la variazione media dei dati dalla retta di regressione, mentre il secondo ci consente di capire se il modello è significativo. Per avere un modello adeguato, l'RSE deve essere il più basso possibile, mentre il p-value deve essere inferiore a 0,05. Altre metriche sono il Multiple R-squared che indica in percentuale quanta variabilità dei dati è spiegata dal modello, l'Adjusted R-squared che tiene conto di una correzione in funzione del numero di variabili impiegate e l'F-statistic che indica se il modello nel suo insieme è significativo.

Appendice D

Vengono riportati gli output calcolati dal software nel caso di modello dello Scenario ottimistico.

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	6.70657	0.29191	22.98	2.66e-09
Anno	0.50274	0.04934	10.19	3.06e-06

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.5175 on 9 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.9202, Adjusted R-squared: 0.9114

F-statistic: 103.8 on 1 and 9 DF, p-value: 3.061e-06

Si osservano le principali metriche di valutazione del modello, come il residual standard error (RSE), su 9 gradi di libertà e il valore del p-value. Il primo indica la variazione media dei dati dalla retta di regressione, mentre il secondo ci consente di capire se il modello è significativo. Per avere un modello adeguato, l'RSE deve essere il più basso possibile, mentre il p-value deve essere inferiore a 0,05. Altre metriche sono il Multiple R-squared che indica in percentuale quanta variabilità dei dati è spiegata dal modello, l'Adjusted R-squared che tiene conto di una correzione in funzione del numero di variabili impiegate e l'F-statistic che indica se il modello nel suo insieme è significativo.

Bibliografia

- [1] [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/fit-for-55/#0>.
- [2] N. Crea, L'innovazione dell'automobile, Treccani (Enciclopedia), 2010.
- [3] ACEA, «Report – Vehicles on European roads 2025,» 2025.
- [4] Al Volante, [Online]. Available: https://www.alvolante.it/da_sapere/legge-e-burocrazia/segmenti-delle-auto-quali-sono-e-cosa-sono-categorie-b-c-d-382356.
- [5] Al Volante, [Online]. Available: <https://www.alvolante.it/news/mercato-dell-auto-italia-immatricolazioni-dicembre-2023-391283>.
- [6] [Online]. Available: <https://www.electricdays.it/mild-hybrid/>.
- [7] [Online]. Available: <https://www.electricdays.it/full-hybrid/>.
- [8] [Online]. Available: <https://www.electricdays.it/plug-in-hybrid/>.
- [9] Nissan, [Online]. Available: https://www.nissan.it/gamma/auto-e-power.html?&cid=psm_cmid=860110475_grid=139486769699_adid=611979990957&gad_source=1&gclid=CjwKCAiArKW-BhAzEiwAZhWsIALdk9VJQe4q2UeAoaTKdKJXjw9uAAGWfrWkoBvhlNMFrZVaUs2_BoCi98QAvD_BwE&gclsrc=aw.ds.
- [10] [Online]. Available: <https://test-driver.it/veicoli-a-celle-a-combustibile-fcev-come-funzionano-le-auto-a-idrogeno/>.
- [11] [Online]. Available: <https://www.newsauto.it/notizie/batterie-auto-elettriche-caratteristiche-autonomia-ricarica-volkswagen-id-2021-317595/#foto-6>.
- [12] [Online]. Available: https://wallbox.com/it_it/pulsar-max-caricatore-socket.
- [13] «Motus-E,» [Online]. Available: <https://www.motus-e.org/faq-items/quante-colonnine-di-ricarica-a-uso-pubblico-ci-sono-in-italia/>.
- [14] Motus-E, «Il futuro della mobilità elettrica in Italia @ 2035,» 2024.
- [15] «Arrow,» 2021. [Online]. Available: <https://www.arrow.com/it-it/research-and-events/articles/regulations-and-certification-for-electric-vehicles>.
- [16] UNI Ente Italiano di Normazione, «ISO 6469-2:2022 Electrically propelled road vehicles - Safety specifications - Part 2: Vehicle operational safety,» 2022.
- [17] CEI, «CEIN EN IEC 61851-1 Sistemi ricarica conduttiva veicoli elettrici,» 2019.
- [18] [Online]. Available: <https://www.vpsolar.com/modalita-ricarica-unauto-elettrica/>.
- [19] [Online]. Available: <https://www.mennekes.it/emobility/informazioni/standard-futuri/>.

- [20] «Motus-e,» [Online]. Available: <https://www.motus-e.org/faq-items/le-auto-elettriche-hanno-un-maggior-rischio-di-incendio/>.
- [21] [Online]. Available: <https://www.autoinsurancenez.com/gas-vs-electric-car-fires/>.
- [22] ACEA, «New Car registrations, European Union,» 22 ottobre 2024.
- [23] A. Stocchetti, «Transizione verso l'elettrico: dinamiche di mercato e ruolo della regolamentazione,» *Osservatorio sulle trasformazioni dell'ecosistema automotive italiano* 2023, 2023.
- [24] OFV, Norwegian Road Federation, 2025. [Online]. Available: <https://www.evcandi.com/norwegian-road-federation-ofv>.
- [25] [Online]. Available: https://greenmove.hwupgrade.it/news/auto-elettriche/altra-pietra-miliare-per-la-norvegia-circolano-piu-auto-elettriche-che-benzina_130774.html.
- [26] «Hdmotori,» 2025. [Online]. Available: [https://www.hdmotori.it/auto/articoli/n604363/norvegia-mercato-auto-elettriche-2024-record/#:~:text=La%20Tesla%20Model%20Y%20%C3%A8,dalla%20Volvo%20EX30%20\(7.229\)](https://www.hdmotori.it/auto/articoli/n604363/norvegia-mercato-auto-elettriche-2024-record/#:~:text=La%20Tesla%20Model%20Y%20%C3%A8,dalla%20Volvo%20EX30%20(7.229)).
- [27] L. Bagnoli, 2024. [Online]. Available: <https://auto.everyeye.it/notizie/tesla-model-y-importante-taglio-prezzo-norvegia-5-000-euro-listino-719415.html>.
- [28] E. Lilli, «motor1.com,» 2025. [Online]. Available: <https://it.motor1.com/news/746058/auto-piu-vendute-2024-classifica/>.
- [29] [Online]. Available: <https://www.hdmotori.it/tesla/articoli/n593961/norvegia-auto-elettriche-settembre-2024-vendite/>.
- [30] R. D. M. G. M. Scorrano, «Dissecting the total cost of ownership of fully electric cars in Italy: The impact of annual distance travelled, home charging and urban driving,» *Transportation Economics*, vol. 80, 2020.
- [31] M. G. L. R. Romeo Danielis, «A probabilistic total cost of ownership model to evaluate the current and,» *Energy Policy*, vol. 119, pp. 268-281, 2018.
- [32] R. D. Andrea Rusich, «Total cost of ownership, social lifecycle cost and energy consumption of various automotive technologies in Italy,» *Transportation Economics*, vol. 50, pp. 3-16, 2015.
- [33] A. N. e. V. C. Simone Franzò, «Factors Affecting Cost Competitiveness of EVs Against Alternative Powertrains: a TCO-based Assessment in the Italian Market,» 2022.
- [34] [Online]. Available: <https://www.confcommercio.it/-/incentivi-auto-moto-non-inquinanti>.
- [35] ACI, «Automobile Club d'Italia- Decreto della Consigliera delegata della Città Metropolitana di Torino,» 2024. [Online]. Available: http://www.up.aci.it/torino/IMG/pdf/TARIFFE_IPT_2024.pdf.
- [36] 2024. [Online]. Available: <https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/bonus-colonnine-domestiche>.

- [37] Regione Piemonte, [Online]. Available: <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/tributi/tassa-automobilistica-bollo-auto>.
- [38] ACI, Automobile Club d'Italia, [Online]. Available: <https://web.aci.it/servizi/criteri-di-calcolo-e-modalita-di-pagamento-addizionale-erariale-superbollo/>.
- [39] [Online]. Available: <https://sisen.mase.gov.it/dgsaie/prezzi-annuali-carburanti?pid=1>.
- [40] [Online]. Available: https://rentedrive.it/blog/tabella-svalutazione-auto-quantit-soldi-perdi-ogni-anno/#Quante_veloce_il_deprezzamento_Tabella_svalutazione_auto.
- [41] [Online]. Available: <https://www.redazionefiscale.it/c/notizie-flash/44267-tasso-di-attualizzazione-e-rivalutazione-al-445-dal-01102024>.
- [42] [Online]. Available: <https://www.alvolante.it/>.
- [43] [Online]. Available: https://wallbox.com/it_it/pulsar-max-caricatore-socket.
- [44] [Online]. Available: <https://www.assicurazione.it/assicurazione-auto/osservatorio-piemonte.html>.
- [45] CarVertical, [Online]. Available: <https://www.missionline.it/mission-fleet-post/chilometri-annui-percorsi-in-auto-italia-1-000-piu-dellucraina/>.
- [46] [Online]. Available: <https://rentedrive.it/blog/costi-manutenzione-auto-come-evitarli>.
- [47] A. Stocchetti, «Tratti evolutivi di una transizione necessaria,» *Osservatorio sulle trasformazioni dell'ecosistema automotive italiano 2022*, 2022.
- [48] A. Pittau, 2024. [Online]. Available: <https://www.autoappassionati.it/quanto-incide-il-prezzo-della-batteria-sul-costodi-unauto-elettrica/>.
- [49] ANFIA, 2024. [Online]. Available: <https://www.anfia.it/it/attivita/studi-e-statistiche/dati-statistici/immatricolazioni/italia>.
- [50] Goldman Sachs , «SNE research,» 2023.
- [51] [Online]. Available: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/policymakers-and-public-authorities/electric-vehicle-model-statistics>.
- [52] Motus-E, 1 Luglio 2024. [Online]. Available: <https://www.motus-e.org/analisi-di-mercato/giugno-2024-e-boom-di-immatricolazioni-elettriche/>.
- [53] 03 marzo 2025. [Online]. Available: <https://www.motus-e.org/analisi-di-mercato/giugno-2024-e-boom-di-immatricolazioni-elettriche/>.
- [54] La Repubblica, Teleborsa, 3 ottobre 2024. [Online]. Available: https://finanza.repubblica.it/News/2024/10/03/bev_nel_2025_l%E2%80%99auto_elettrica_avra_il_24percento_del_mercato_di_massa_quando_i_modelli_piu_economici_-205/.
- [55] M. S. M. F. Jung, «exponential adoption of battery electric cars,» *PLOS ONE*, vol. 18, n. 12, 2023.

- [56] Quintegia, 11 Marzo 2024. [Online]. Available: <https://www.quintegia.it/elettrificazione-in-italia-tra-sfide-e-progressi-verso-il-2030/>.
- [57] ARERA, «Contributo potenziale della ricarica bidirezionale dei veicoli elettrici all'efficienza e alla decarbonizzazione del sistema elettrico italiano,» 2024.
- [58] E. P. O. Liakh, «Verso una mobilità decarbonizzata: ostacoli, policy e buone pratiche,» *CIMET*, 2023.
- [59] Terna, «Rapporto Mensile sul Sistema Elettrico,» Dicembre 2024.
- [60] Camera dei deputati servizio studi, «Le politiche pubbliche italiane: Le fonti rinnovabili,» 2024.
- [61] [Online]. Available: <https://www.ilmcambiamento.it/articoli/paea-l-energia-pulita-e-gia-qui-basta-conoscerla>.
- [62] [Online]. Available: <https://farelettronica.it/stazioni-di-ricarica-per-i-veicoli-elettrici/>.
- [63] R. C. M. Kane, «INSIDEEVs,» [Online]. Available: <https://insideevs.it/news/724091/nio-battery-swap-station-4/>.
- [64] [Online]. Available: https://insideevs.it/photos/885300/nio-power-swap-station-40/#7807107_stazione-nio-power-swap-40.
- [65] [Online]. Available: <https://insideevs.it/news/708066/pairtree-stazione-solare-autonoma/>.
- [66] A. & P. D. & C. F. & J. J. & B. S. & N. V. S. & Z. V. Bejtullahu, «An Overview of Electric Vehicles in Kosovo,» 2024.
- [67] I. H. A. M. K. U. R. A. M. E. M. A. S. N. Z. Ullah, «A survey on enhancing grid flexibility through bidirectional interactive,» *Energy Reports*, pp. 5149-5162, 2024.
- [68] [Online]. Available: <https://www.chinaevcharger.com/info/explanation-on-vehicle-to-home-v2h-102708107.html>.
- [69] [Online]. Available: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/vehicle-to-load-v2l-explained>.
- [70] A. Suri, ezoomed, [Online]. Available: <https://www.ezoomed.it/blog/sistemi-di-ricarica/vehicle-to-load-v2l/>.
- [71] UNI , «UNI EN ISO 15118-20 Veicoli stradali- Interfaccia di comunicazione tra veicolo e infrastruttura di ricarica,» 2022.